

Zwiększenie mrozoodporności betonu dzięki dodatkowi cementu zawierającego domieszkę napowietrzającą

The increase of concrete frost resistance by using cement with air-entraining agent

Słowa kluczowe: cementy napowietrzające beton, wytrzymałość, mrozoodporność betonu

Key words: cement with air entraining agent, frost resistant concrete

1. Wprowadzenie

Beton jest narażony na szkodliwe oddziaływania środowiska, przede wszystkim na agresję chemiczną i wpływ cyklicznego zamarzania. Odpowiedni skład, prawidłowe wykonanie, zabudowanie oraz pielęgnacja zapewnia trwałość betonu, nawet w trudnych warunkach eksploatacji (1). Do obiektów budowlanych najbardziej narażonych na niszczące oddziaływanie środowiska należy zaliczyć mosty i wiadukty, betonowe nawierzchnie drogowe, chodniki i krawężniki drogowe, konstrukcje betonowe będące w kontakcie z wodą, a w szczególności z wodą morską. Nieodporny na działanie mrozu beton jest bardzo często przyczyną uszkodzeń konstrukcji, których naprawa jest bardzo kosztowna i nie zawsze w pełni zadowalająca (2). Obszerna literatura przedmiotu oraz praktyka dowiodły, że beton z cementów wieloskładnikowych CEM II÷CEM V, z dużą zawartością dodatków mineralnych, między innymi granulowanego żużla wielkopieczowego lub krzemionkowego popiołu lotnego, pomimo lepszej szczelności, wykazuje mniejszą odporność na działanie mrozu w stosunku do betonu z cementu portlandzkiego CEM I (3-9).

W celu poprawy mrozoodporności betonu wykonanego z cementu z dodatkami mineralnymi, Komitet 201 Amerykańskiego Instytutu Betonu (ACI) (10) zaleca stosowanie napowietrzenia mieszanki betonowej. Także europejska norma EN 206-1:2013, podkreśla konieczność napowietrzania mieszanki betonowej dla klas ekspozycji XF. W tym przypadku minimalne napowietrzenie betonu powinno być utrzymane na poziomie 4%. Uzyskanie odpowiedniego napowietrzenia betonu z cementu o dużej zawartości dodatków mineralnych jest trudne i wymaga doboru ilości domieszki napowietrzającej w zależności od rodzaju i zawartości dodatku mineralnego (1-3,5,10).

Metodę napowietrzania mieszanki betonowej przez dodatek domieszki zawartej w cemencie uwzględniają normy amerykańskie;

1. Introduction

The concrete is susceptible to adverse environmental influences, primarily chemical attack and the effect of cycling freezing. The appropriate composition, proper concreting and curing can assure concrete durability, even in difficult exploitation condition (1). Bridges, overpasses, walkways, pavements and curbs are concrete structures that are the most exposed to environmental influences damaging concrete constructions, including contact with water, especially seawater. Non frost-resistant concrete is very often causing the construction damages which repairs are very costly and not always fully satisfactory (2). The literature data and practice have shown that concrete of blended cements (CEM II÷CEM V) with high content of mineral additions, including granulated blastfurnace slag or siliceous fly ash, give concrete with lower frost resistance compared to Portland cement CEM I concrete, despite their higher tightness (3-9).

The Committee 201 of the American Concrete Institute (ACI) (10) recommends the usage of air entrainment concrete in order to improve frost resistance of this composite from cement with mineral additions. The European standard EN 206-1:2013 also recommend the air entrainment of concrete for XF exposure classes. In this case, minimal air entrainment of concrete should be maintained at the level of 4%. The appropriate air entrainment of concrete from cement with high content of mineral additions is difficult and requires the selection of air-entraining agent, depending on the type and content of mineral additions (1-3, 5, 10).

American standards: ASTM C150 (11) for Portland cement and ASTM C595 (12) for blended cements include the method of concrete mix air entraining by cement usage with air entraining agent.

In this paper the studies are presented aiming to prepare cements containing air-entraining agent, which use in concrete production

dla cementów portlandzkich norma ASTM C150 (11), a dla cementów wieloskładnikowych norma ASTM C595 (12).

W artykule przedstawiono badania mające na celu przygotowanie cementów z dodatkami domieszek napowietrzających, których stosowanie w produkcji betonu zapewniałoby uzyskanie napowietżenia betonu w zakresie 4-6%. Przy odpowiednim stopniu napowietżenia, domieszka ta powinna zapewnić dobrą mrozoodporność betonu. W doświadczeniach stosowano głównie cementy wieloskładnikowe CEM II oraz CEM V, przygotowane w laboratorium.

Obok badań laboratoryjnych przeprowadzono również doświadczenia poligonowe, w których stosowano beton wyprodukowany w warunkach przemysłowych z cementu hutniczego CEM III/A 42,5N NA, z dodatkiem domieszki napowietrzającej AirPak. Sprawdzano zarówno właściwości mieszanki betonowej, jak i stwardniałego betonu.

2. Materiały i metody

W doświadczeniach stosowano następujące cementy: cement portlandzki CEM I [jako wzorzec], cement portlandzki popiołowy CEM II/B-V, cement portlandzki żuźlowy CEM II/B-S, cement hutniczy CEM III/A NA oraz cement wieloskładnikowy CEM V/A-(S-V) żuźlowo-popiołowy. Cementy te uzyskano w laboratorium mieszając przemysłowy cement portlandzki CEM I 52,5R ze zmielonym żużlem wielkopieczowym lub popiołem lotnym, w ilości zapewniającej maksymalną zawartość normową tych dodatków mineralnych. Stosowano popiół lotny krzemionkowy, wykazujący 2,3% strat prażenia, o powierzchni właściwej 190 m²/kg, granulowany żużel wielkopieczowy o zawartości fazy szklistej około 99% i powierzchni właściwej 480 m²/kg. Do cementów dodano zmielony gips z odsiarczania spalin w ilości zapewniającej stałą zawartość SO₃, wynoszącą 3,0%. Przygotowywano po dwa takie same cementy, przy czym jeden jako napowietrzający, zawierał odpowiedni dodatek domieszki AirPak, a drugi referencyjny, był bez domieszki. Dodatek domieszki napowietrzającej do cementów ustalono na poziomie zapewniającym stopień napowietżenia mieszanki betonowych wynoszący 4-6%. Napowietżenie stwardniałego betonu, obejmujące zawartość porów powietrznych, wielkość i rozkład porów; określano zgodnie z normą EN 480-11, metodą mikroskopową z komputerową analizą obrazu.

Zakres badań cementów obejmował:

- wodożądność, czas wiązania i stałość objętości zgodnie z normą PN EN 196-3,
- konsystencję zaprawy (rozplływ na stoliku) zgodnie z normą PN EN 1015-3,
- wytrzymałość na ściskanie zgodnie z normą PN EN 196-1,
- zawartość powietrza w zaprawie zgodnie z normą PN EN 1015-7.

would assure air entraining of concrete in the range of 4-6%. The admixture should ensure good frost-resistance concrete in the case of suitable air entraining. Blended cements CEM II and CEM V, laboratory prepared, were used in experiments.

Additionally to laboratory tests the infield experiments, that used industrially manufactured concrete from blastfurnace cement CEM III/A 42,5 N – NA with AirPak air entraining agent, were also conducted. The concrete mix and hardened concrete properties have been verified.

2. Materials and methods

The following cements were used in experiments: Portland cement CEM I [as a reference], Portland-fly ash cement CEM II/B-V, Portland-slag cement CEM II/B-S, Blastfurnace cement CEM III/A – NA and blended slag-fly ash cement CEM V/A (S-V). These cements were obtained in laboratory by mixing industrial CEM I 52,5 R Portland cement with ground blast furnace slag or fly ash. The content of mineral additions was at the maximum standard level. The siliceous fly ash showing 2.3% loss on ignition, and a specific surface area of 1900 cm²/g and granulated blastfurnace slag containing 99% of glass having specific surface area of 4800 cm²/g, were used. Ground by-product gypsum, from flue gas desulfurization, added in quantity to assure SO₃ content of 3.0%, was added to cements. In each series two cements of the same composition have been prepared. The first cement, containing suitable AirPak admixture, was used as air entrainer. The second cement, without admixture was reference cement. The addition of air entraining agent to cements was set at the level that ensured the content of air in concrete mixes, at the level of 4-6%. Air entraining of hardened concrete, including the contents of air pores, pore size distribution, applying microscopic image computer analysis in accordance with EN 480-11, was determined.

Cements testing included:

- water demand, setting time and soundness according to PN-EN 196-3,
- mortars consistency (flowing diameter and time) according to PN-EN 1015-3,
- compressive strength according to PN-EN 196-1,
- air content in the mortar according to PN-EN 1015-7.

The concretes made of CEM II/B-V and CEM III/A – NA has been tested. Blastfurnace cement was also used for infield concrete production.

Concrete testing prepared in laboratory included:

- air content in concrete mix according to PN-EN 12350,
- air entraining level of hardened concrete with cement CEM II/B-V: air content, pore size distribution according to PN-EN 480-11,
- compressive strength of concrete according to PN-EN 12390-3,

Tablica 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI CEMENTÓW NAPOWIETRZAJĄCYCH

AIR ENTRAINING CEMENTS PROPERTIES

Cement		Zawartość powietrza Air content, %	Wodożądność, Water demand, %	Początek i koniec wiązania Initial and final setting time, min.		Konsystencja zaprawy Mortar consistency, cm
CEM I	Referencyjny Reference	-	29.9	148	178	15,8
	Napowietrzony Air-entrained	11.0	29.4	166	198	17,4
CEM II/B-V	Referencyjny Reference	-	30.7	182	227	17,1
	Napowietrzony Air-entrained	9.4	30.3	209	294	18,0
CEM II/B-S	Referencyjny Reference	-	30.0	225	295	16,7
	Napowietrzony Air-entrained	10.0	30.2	225	295	18,6
CEM III/A NA	Referencyjny Reference	-	31.0	230	325	16,3
	Napowietrzony Air-entrained	8.6	29.5	270	374	16,7
CEM V/A (S-V)	Referencyjny Reference	-	31.7	251	313	16,0
	Napowietrzony Air-entrained	10.0	30.7	282	343	17,1

Badano betony wykonane z cementów CEM II/B-V i CEM III/A NA. Cement hutniczy CEM III/A zastosowano także do wykonania betonu poligonowego.

Zakres badań betonu przygotowanego w skali laboratoryjnej obejmował:

- zawartość powietrza w mieszance betonowej zgodnie z normą PN EN 12350,
- stopień napowietrzenia stwardniałego betonu z cementu CEM II/B-V: zawartość powietrza, wielkość i rozkład porów według normy PN EN 480-11,
- wytrzymałość betonu na ściskanie zgodnie z PN EN 12390-3,
- mrozoodporność betonu zgodnie z normą PN-88/B-06250.

Zakres badań betonu przemysłowego, przeznaczonego do doświadczeń poligonowych obejmował:

- konsystencję mieszanki betonowej zgodnie z PN-EN 12350-2:2011,
- zawartość powietrza w mieszance betonowej zgodnie z PN-EN 12350-7:2011,
- charakterystykę porów powietrznych w mieszance betonowej metodą AVA,
- wytrzymałość betonu według PN-EN 12390-3:2011,
- nasiąkliwość według PN-B-06250:1988,
- mrozoodporność dla stopnia F150 zgodnie z normą PN-B-06250:1988,
- mrozoodporność z udziałem soli odladzających zgodnie z PKN-CEN/TS 12390-9:2007,
- wodoszczelność betonu dla stopnia W8 zgodnie z PN-B-06250:1988.

- frost resistance of concrete according to PN-88/B-06250.

The tests of concrete produced and applied infield included:

- consistency of concrete mix according to PN-EN 12350-2:2011,
- air content in the concrete mix according with PN-EN 12350-7:2011,
- characteristics of air pores in the concrete mix by AVA method,
- strength of concrete according to PN-EN 12390-3:2011,
- absorptivity according to PN-B-06250:1988,
- frost resistance for F150 grade according to PN-B-06250:1988,
- frost resistance in presence of de-icing salts according to the PN-CEN/TS 12390-9:2007,
- waterproof of concrete equal W8 grade according to PN-B-06250:1988.

3. Research results and discussion

3.1. Cements properties

Examination results of the air entrainment grade and standard properties of mortars of CEM I, CEM II/B-V, CEM III/A – NA and CEM V/A (S-V) are given in Tables 1 and 2. The results of the strength properties are shown in Table 2.

Based on the obtained results it can be concluded that cements containing air entraining admixture shows an extended setting time by 30 to 45 minutes. Air entraining cements have lower water demand to achieve standard consistency of cement paste. Besides, they have clearly better consistency compared to the reference cement [Table 1]. The exception is CEM II/B-S cement, which has much higher water demand, but greater flow diameter [consistency].

Tablica 2 / Table 2

WYTRZYMAŁOŚĆ CEMENTÓW NAPOWIETRZAJĄCYCH
COMPRESSIVE STRENGTH OF AIR ENTRAINING CEMENTS

Cement		Wytrzymałość na ściskanie zaprawy normowej Compressive strength of standard mortar, MPa		Spadek wytrzymałości Strength loss, %	
		2 dni/days	28 dni/days	2 dni/days	28 dni/days
CEM I	Referencyjny / Reference	27.3	55.2	-	-
	Napowietrzony / Air-entrained	23.3	50.3	15.0	9.0
CEM II/B-V	Referencyjny / Reference	25.0	43.4	-	-
	Napowietrzony / Air-entrained	18.5	32.5	26.0	25.0
CEM II/B-S	Referencyjny / Reference	19.4	53.5	-	-
	Napowietrzony / Air-entrained	20.0	47.9	+1.0	10.0
CEM III/A NA	Referencyjny / Reference	12.3	52.4	-	-
	Napowietrzony / Air-entrained	9.7	39.2	10.5	25.2
CEM V/A(S-V)	Referencyjny / Reference	22.3	51.3	-	-
	Napowietrzony / Air-entrained	18.5	39.8	17.0	22.4

3. Wyniki badań i ich omówienie

3.1. Właściwości cementów

Wyniki stopnia napowietrzenia i właściwości normowe zapraw wykonanych z cementów CEM I, CEM II/B-V i CEM III/A NA oraz CEM V/A-(S-V) podano w tablicach 1 i 2. Wyniki wytrzymałości cementów zamieszczono w tablicy 2.

W oparciu o uzyskane wyniki badań czasu wiązania można stwierdzić, że cementy z domieszką napowietrzającą wykazują opóźniony początek wiązania o 30 do 45 minut. Cementy napowietrzające, co należy podkreślić, mają mniejszą wodożądność, wymaganą do osiągnięcia konsystencji normowej zaczynu cementowego oraz wyraźnie lepszą konsystencją w porównaniu do cementów referencyjnych, bez domieszki napowietrzającej [tablica 1]. Wyjątek stanowi cement CEM II/B-S, który ma nieznacznie większą wodożądność, jednak największy rozptył [konsystencję].

Wytrzymałość na ściskanie po 2 i 28 dniach cementów z domieszką napowietrzającą [tablica 2] jest znacznie mniejsza. Spadek wytrzymałości po 2 i 28 dniach, w porównaniu do cementu bez domieszki, jest zróżnicowany w zależności od rodzaju cementu i zawartości domieszki. Zmniejszenie wytrzymałości po 2 dniach jest zawarte w przedziale od 10% do 26%, jedynie w przypadku cementu CEM II/B-S, spadek wytrzymałości nie wystąpił po dwóch dniach. Podobne zmniejszenie wytrzymałości wystąpiło po 28 dniach twardnienia. Generalnie można stwierdzić, że domieszka zmniejsza wytrzymałość wszystkich cementów o jedną klasę. Można było się tego spodziewać gdyż zwiększa ona porowatość zapraw, w przybliżeniu o 9%.

3.2. Właściwości betonu

Skład mieszanki betonowej odpowiadał betonowi wzorcowemu zgodnie z normami PN EN 480-1 (13) oraz PN EN 934 (14). Proporcje składników mieszanek betonowych zostały ustalone

Compressive strength after 2 and 28 days of cement containing air-entraining admixture [Table 2] are much lower. Decrease in strength after 2 and 28 days, compared to cement without admixture, is varied depending on the type of cement and the admixture content. Strength reduction after 2 days is set in the range of 10 to 26%. Strength loss after two days has not occurred only for CEM II/B-S cement. Similarly, strength reduction occurred after 28 days of hardening. Generally, it can be stated, that the addition of admixture reduces of one class of all cements strength. It is caused by the mortars porosity increase approximately of 9%.

3.2. Concrete properties

Composition of concrete mix corresponds to the standard given in PN-EN 480-1 (13) and PN-EN 934 (14). Proportions of ingredients in concrete mixtures were experimentally determined at constant ratio of $w/c = 0,45$ and V2 consistency. Air entraining grade of standard cement mortar was 9.5% for CEM II/B-V and 8.6% for blastfurnace cement CEM III/A, respectively.

Air entrained concrete of CEM III/A – NAAirPak for field testing was produced in concrete mixing plant. Composition of mixture was adjusted to meet requirements for XF4 exposure class according to PN-EN 206:2014, i.e. cement content in 1 m³ of mixture was at least 340 kg and maximum water to cement ratio was $\leq 0,45$. Concrete compositions are given in Table 3.

3.2.1. Laboratory concretes

The cubic concrete samples with dimensions of 150 mm were made in accordance with EN 480-1. Tests results are presented in Table 4. Hardened concrete air entrainment tests results, concerning pores content and size distribution are summarized in Table 5. Concrete was tested after 28 days of hardening. Microscope computer image analysis of polished specimens of concrete are shown in Figs. 1 and 2 which histograms of the air pore size distribution are presented.

Tablica 3 / Table 3

SKŁAD I WŁAŚCIWOŚCI MIESZANKI BETONOWEJ I BETONU

COMPOSITION AND PROPERTIES OF CONCRETE MIXES AND CONCRETES

Składniki / Constituents	Beton / Concrete of cement, kg/m ³		
	CEM II/B-V	CEM III/A NA	CEM III/A NA AirPak Próba technologiczna Produced in concrete plant
Piasek/Sand 0/2	525	525	670
Żwir/Gravel 2/8	-	-	456
Żwir/Gravel 8/16	-	-	640
Kruszywo granitowe Granite aggregate 2/8	390	390	-
Kruszywo granitowe Granite aggregate 8/18	373	373	-
Kruszywo granitowe Granite aggregate 16/22	515	515	-
Cement	380	380	350
Woda/Water	171 dm ³	171 dm ³	158 dm ³
Superplastyfikator / Superplasticizer	0.4% / 0.2%*	0.5% / 0.3%*	0.9%*
Konsystencja – czas Vebe V2 Consistency – Vebe time V2	12s / 11s*	12 s / 12s*	-
Zawartość porów powietrznych / Air pore content:			
Beton nienapowietrzony / Reference concrete	1.4%	1.8%	-
Beton napowietrzony / Air-entraining concrete	5.6%	3.4%	4.5%

* dla cementów napowietrzonych/for air-entraining concrete

Tablica 4 / Table 4

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE I MROZODPORNOŚĆ BETONÓW

COMPRESSIVE STRENGTH AND FROST RESISTANCE OF CONCRETES

Beton/Concrete		Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa 28 days	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa		Mrozoodporność Frost resistance F 250	
			Warunki normalne Normal condition	Zamraż/rozmrz. Freezing/thawing*	Spadek wytrzymałości Strength loss, %	Spadek masy Mass loss, %
CEM II/B-V	Referencyjny Reference	59.3	70,1	66.7	5.0	1.10
	Napowietrzony Air-entrained	42.5	53,6	56.7	+1.1	0.11
CEM III/A NA	Referencyjny Reference	68.4	72,0	72.0	0	0.13
	Napowietrzony Air-entrained	57.4	63.5	65.0	+1.0	0.08

*Po 150 cyklach/After 150 cycles

doświadczalnie, przy stałym współczynniku w/c=0,45 i konsystencji V2. Odpowiednio stopień napowietrzenia normowej zaprawy cementowej wynosił 9,5% (cement CEM II/B-V) i 8,6% (cement hutniczy CEM III/A).

Beton z cementu napowietrzającego CEM III/A NA AirPak wyprodukowany został podczas próby technologicznej w wytwórni betonu towarowego. Skład mieszanki dobrano tak, aby spełniał wymagania dla klasy ekspozycji XF4 według PN-EN 206:2014, czyli zawartość cementu w 1 m³ mieszanki wynosiła co najmniej 340 kg, a maksymalny stosunek wody do cementu ≤ 0,45. Składy badanych betonów podano w tablicy 3.

Total air pore content in concrete from CEM II/B-V cement was 4.9%, while in concrete of cement without admixture was 2.1% [Table 5]. Thus, air pore content meet the requirement of PN-EN 206 for XF4 exposure class, which should be at least 4%. In the case of concrete from the air entraining cement CEM II/B-V all porosity parameters of concrete are fulfilled standard requirements: L, α and A₃₀₀; according PN-EN 480-11.

Tablica 5 / Table 5

POROWATOŚĆ BETONU Z CEMENTU CEM II/B-V WEDŁUG PN-EN 480-11

POROSITY OF CONCRETE FROM CEMENT CEM II/B-V ACCORDING TO PN-EN 480-11

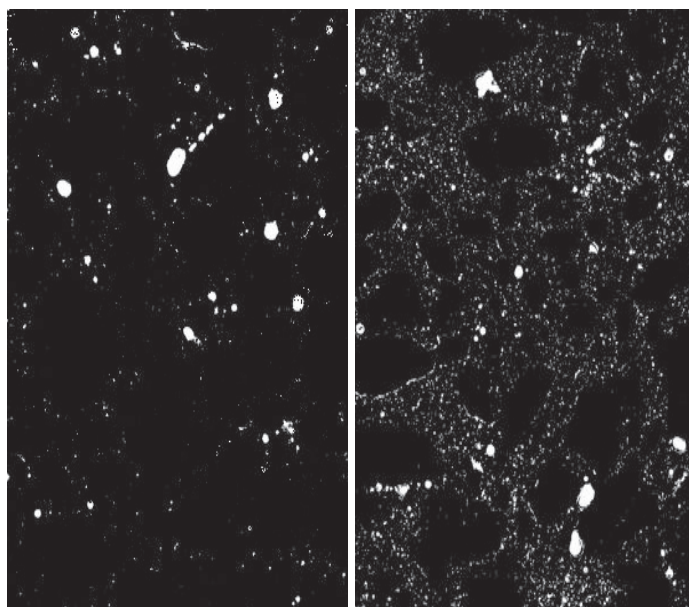
Beton/Concrete		Charakterystyka porowatości/Porosity parameters			
		A, %	α , 1/mm	L, mm	A ₃₀₀ , %
CEM II/B-V	Referencyjny / Reference	2.05	51.8	0.134	0.63
	Napowietrzony / Air-entrained	4.86	44.1	0.115	2.67

L – wskaźnik rozmieszczenia porów/pore distribution index

A – całkowita zawartość porów powietrznych/air pore total content

A₃₀₀ – zawartość makroporów, o średnicy mniejszej od 0,3 mm/content of macrospores lower than 0.3 mm

α – powierzchnia właściwa porów/pore specific surface



Rys. 1. Komputerowa analiza obrazu wypolerowanych i skontrastowanych zglądów betonów. Po lewej stronie beton z CEM II/B-V bez domieszki napowietrzającej, z prawej strony beton z CEM II/B-V z domieszką napowietrzającą

Fig. 1. Computer image analysis of polished and contrasted concrete specimens. On the left concrete containing CEM II/B-V without air-entraining admixture. On the right concrete containing CEM II/B-V with air-entraining admixture.

3.2.1. Betony laboratoryjne

Próbki betonu wykonano zgodnie z normą EN 480-1 w formach sześciennych o wymiarach boku 150 mm. Wyniki badań przedstawiono w tablicy 4. Wyniki badań stopnia napowietrzenia stwardniałego betonu, to jest: zawartości porów powietrznych, wielkości i rozkładu porów, zestawiono w tablicy 5. Badano beton po 28 dniach twardnienia. Komputerową analizę obrazu wypolerowanych i skontrastowanych próbek zglądów, wykonanych z napowietrzonych betonów, pokazano na rysunku 2. Na rysunku 3

The results presented in Table 5 show that air entrained concrete has higher macropores content with diameter lower than 0.3 mm in comparison to the reference concrete. These macropores are quite regularly dispersed in cement matrix. Their content of 2.7% is much higher than standard requirement, which equals 1.8% for the XF4 exposure class (15, 16). Pore distribution index L is also fulfilling the requirements of the standard.

Obtained results confirm the usefulness of the concrete mix air entraining method by addition of air entraining agent with cement. This method may be useful for the production of frost resistant concrete (19). Presented in Table 4 results confirm the decrease of compressive strength of concrete containing air-entraining cement, similarly as for mortar. This relationship must be taken into consideration when designing the assumed concrete classes. This is a routine operation for the classical concrete air entrained by addition of air entraining agent.

3.2.2. Field concrete testing

For field concrete examination the panels of 3 m x 3 m x 0.2 m were produced, in autumn condition. In contrast, the control samples were casted and cured in condition specified by PN-EN 12390-2:2011 standard.

Concrete mix consistency, remained at the level of the S3 class according to PN-EN 206:2014 for the first 30 minutes, after mixing. After next 30 minutes, the slump was already significantly lower [S2 class; Fig. 3]. However, it should be noted, that assuring the required concrete mix consistency, as its maintenance over time were not the purpose of infield tests. Therefore, no other admixtures were used, which could, on the other hand, lead to the further concrete porosity increase.

Air entrainment test results of concrete mix, executed with pressure method, have shown that air content as a function of time remained constant within the range of 4% to 5% [Fig. 4].

Air entrainment parameters of concrete mix were examined by AVA method. Results showed that air pores distribution content

Tablica 6 / Table 6

CHARAKTERYSTYKA PORÓW POWIETRZNYCH W MIESZANCE BETONOWEJ OZNACZONA METODĄ AVA

AIR PORES CHARACTERISTICS IN CONCRETE MIX BY AVA METHOD

Całkowita zawartość porów Total pore content, %	Zawartość makroporów Macropore content A ₃₀₀ , %	Wskaźnik rozmieszczenia Pore distribution index, mm
5.0	2.2	0.193

Tablica 7

NASIĄKLIWOŚĆ I MROZODPORNOŚĆ BETONU POLIGONOWEGO

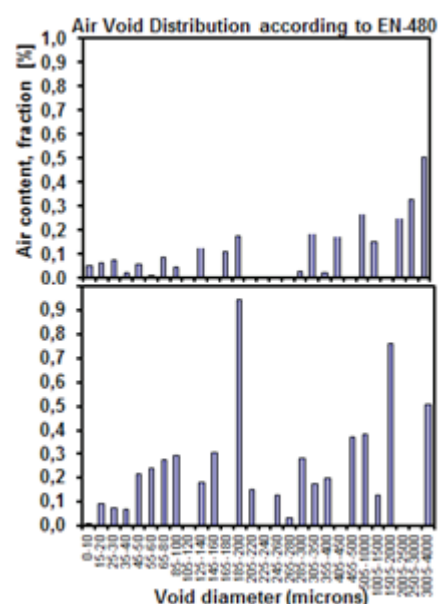
Właściwość	Wynik badania	Wymaganie normowe
Nasiąkliwość, % po: - 28 dniach - 56 dniach - 90 dniach	5,6 5,2 5,1	< 5,0 dla betonów narażonych na działanie czynników atmosferycznych, PN-B-06250:1988
Głębokość penetracji wody w mm podczas badania stopnia wodoszczelności W8 po: - 28 dniach - 56 dniach - 90 dniach	47 38 30	określane w specyfikacji technicznej
Ubytek masy w % po badaniu mrozoodporności dla stopnia F150	2,6	< 5,0 wg PN-B-06250:1988
Spadek wytrzymałości w % po badaniu mrozoodporności dla stopnia F150	5,1	< 20,0 wg PN-B-06250:1988
Złuszczenie betonu w kg/m ² po badaniu mrozoodporności w obecności soli odladzającej, po 28 cyklach – rozpoczęcie badania po 28 dniach	0,64	< 1,0 dla kategorii FT1 wg PN-EN 13877:2007
Złuszczenie betonu [kg/m ²] po badaniu mrozoodporności w obecności soli odladzającej (28 cykli) – rozpoczęcie badania po 56 dniach	0,38	< 0,5 dla kategorii FT2 wg PN-EN 13877:2007
Złuszczenie betonu [kg/m ²] po badaniu mrozoodporności w obecności soli odladzającej (28 cykli) – rozpoczęcie badania po 90 dniach	0,12	

przedstawiono rozkład wielkości porów powietrznych, w postaci histogramów.

Całkowita zawartość porów powietrznych w betonie z cementu napowietrzającego CEM II/B-V wynosiła 4,9%, natomiast w betonie z cementu bez domieszki 2,1% [tablica 5]. Zawartość porów powietrznych spełniała więc wymagania normy PN EN 206 dla klasy ekspozycji XF4 w przypadku cementu napowietrzającego, która powinna wynosić minimum 4%. Porowatość betonu z cementu napowietrzającego CEM II/B-V miała dobre wszystkie parametry napowietrzenia: L , α i A_{300} , wyznaczone normą PN-EN 480-11.

Wyniki zestawione w tablicy 5 pokazują, że beton napowietrzony ma w porównaniu do betonu referencyjnego większą zawartość makroporów o średnicy mniejszej od 0,3 mm, w miarę regularnie rozproszonych w matrycy cementowej. Ilość tych makroporów, wynosząca 2,7%, jest znacznie większa od wymagań normowych, które dla klasy ekspozycji XF4 wynosi 1,8% (15,16). Wskaźnik rozmieszczenia porów L także spełnia normowe wymagania.

Uzyskane wyniki potwierdzają przydatność metody napowietrzenia mieszanki betonowej przez dodatek domieszki napowietrzającej



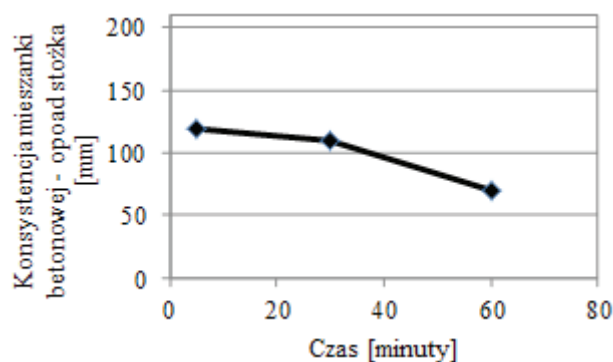
Rys. 2. Rozkład wielkości porów w stwardniałym betonie. U góry beton z CEM II/B-V bez domieszki napowietrzającej, na dole beton z CEM II/B-V z domieszką napowietrzającą

Fig. 2. Pore size distribution in hardened concrete. At the top - concrete of CEM II/B-V without air-entraining admixture. Under it - concrete of CEM II/B-V with AirPack

Table 7

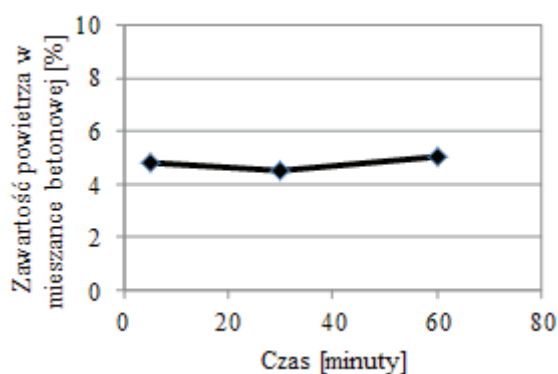
ABSORPTION AND FROST-RESISTANCE OF INFILLED CONCRETE

Property	Test result	Standard requirement
Absorption, % after: 28 days 56 days 90 days	5.6 5.2 5.1	< 5.0 for concrete exposed to atmosphere, PN-B-06250:1988
Water depth penetration in mm during waterproof test W8 after: 28 days 56 days 90 days	47 38 30	defined in technical specification
Mass loss, % after freezing/thawing [F150]	2.6	< 5.0 according to PN-B-06250:1988
Strength loss in % after frost resistance test [F150]	5.1	< 20.0 according to PN-B-06250:1988
Thaw scaling of concrete [kg/m ²] after frost resistance test in presence of de-icing salt [28 cycles], after 28 days of curing	0.64	< 1.0 for category FT1 according to PN-EN 13877:2007
Thaw scaling of concrete [kg/m ²] after frost resistance test in presence of de-icing salt [28 cycles], after 56 days of curing	0.38	< 0.5 for category FT2 according to PN-EN 13877:2007
Thaw scaling of concrete [kg/m ²] after frost resistance test in presence of de-icing salt [28 cycles], after 90 days of curing	0.12	



Rys. 3. Konsystencja mieszanki betonowej

Fig. 3. Concrete mix consistency



Rys. 4. Zawartość powietrza w mieszance betonowej

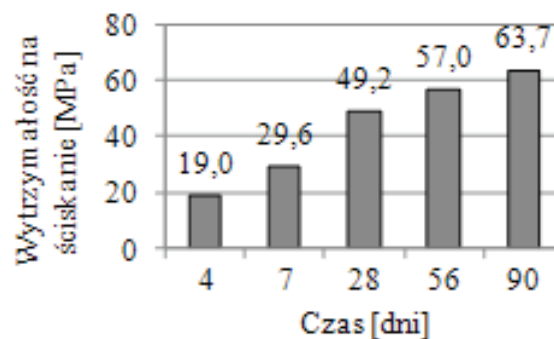
Fig. 4. Air content in concrete mix

do cementu. Metoda ta może być przydatna do produkcji betonów mrozoodpornych (19). Podobnie jak dla zapraw, wyniki podane w tabelicy 4 potwierdzają spadek wytrzymałości na ściskanie betonu z cementu zawierającego domieszkę napowietrzającą. Taka zależność musi być brana pod uwagę przy projektowaniu zakładanych klas betonu. Jest to rutynowe działanie przy klasycznym napowietrzaniu betonu poprzez wprowadzenie domieszki napowietrzającej do betonu.

3.2.2. Beton poligonowy

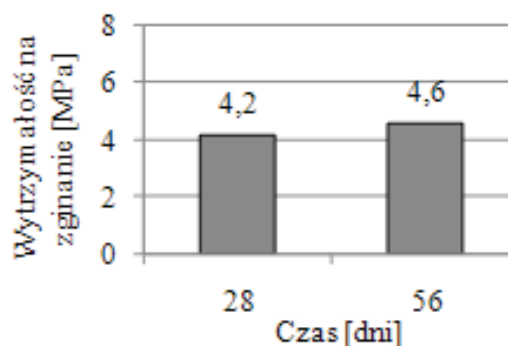
Próba technologiczna polegała na wykonaniu płyty o wymiarach 3 m x 3 m x 0,2 m, w warunkach jesiennych. Natomiast próbki kontrolne formowano i przechowywano w warunkach podanych w normie PN-EN 12390-2:2011.

Konsystencja mieszanki betonowej przez pierwsze 30 minut po zarobieniu betonu, utrzymywała się na poziomie klasy S3 według PN-EN 206:2014. Po kolejnych 30 minutach opad stożka był już wyraźnie mniejszy [klasa S2; rysunek 4]. Należy jednak zaznaczyć, że uzyskanie założonej konsystencji mieszanki betonowej i jej utrzymanie w czasie nie było celem przeprowadzonej próby poligonowej. Z tego względu nie stosowano innych domieszek, które zresztą mogły spowodować dalszy wzrost porowatości betonu.



Rys. 5. Wytrzymałość na ściskanie betonu z próby poligonowej

Fig. 5. Compressive strength of field tested sample



Rys. 6. Wytrzymałość na zginanie betonu

Fig. 6. Flexural strength of concrete

[0.192 mm] and macropore content [$<0,300$ mm] suggested that hardened concrete will be frost resistant [Table 6].

Figs. 5 and 6 show significant strength increase of field tested concrete, with time. This tendency is typical in the case of concrete containing, besides clinker, mineral additions (except limestone). Particularly, this refers to CEM III/B blastfurnace cement, with high content of granulated blastfurnace slag.

Absorption and frost resistance examinations results [Table 7] showed that infield concrete is waterproof and frost resistant. However, the absorption was higher relative to requirement (5%) of withdrawn standard (PN-B-06250:1998) for ordinary concrete, but this requirement can be regarded as negligible considering the satisfactory frost resistance of this concrete. Reduction of depth of under pressure water penetration with curing time and increased frost resistance and hence durability improvement was an important property of the field curing concrete. It was, as in the case of strength, due to concrete of blastfurnace cement and consistent with the literature (1, 17, 18). This is a beneficial effect of ground granulated blast furnace slag on the microstructure of hardening cement paste, after a long period.

Therefore, some studies connected with concrete durability, in some technical specifications, are carried out in the equivalent strength time with respect to 28 days of hardening as in the case of Portland cement (20). It is recommended to test concrete durability

Wyniki badań napowietrzenia wykonane metodą ciśnieniową wykazały, że zawartość powietrza utrzymywała się na stałym poziomie, w zakresie od 4% do 5% [rysunek 4].

Charakterystyka napowietrzenia mieszanki zbadana metodą AVA pokazała, że wskaźnik rozmieszczenia porów powietrznych [0,192 mm] oraz zawartość makroporów [$< 0,300$ mm] pozwalają przypuszczać, że stwardniały beton będzie mrozoodporny [tablica 6].

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono wzrost wytrzymałości betonu poligonowego, który był znaczny. Tendencja ta jest typowa w przypadku betonów z cementów zawierających oprócz klinkieru dodatki mineralne, z wyjątkiem wapienia. Dotyczy to w szczególności cementów hutniczych CEM III/B, o dużej zawartości granulowanego żużla wielkopieczowego.

Wyniki badań nasiąkliwości i mrozoodporności [tablica 7] wykazały, że beton poligonowy jest wodoszczelny oraz mrozoodporny. Wprawdzie nasiąkliwość była większa niż 5% wymagana przez wycofaną normę (PN-B-06250:1988) dla betonu zwykłego, jednak wobec zadowalającej odporności na działanie mrozu, wymaganie to można uznać za mało istotne. Ważną właściwością betonu poligonowego było zmniejszenie z biegiem czasu dojrzewania głębokości wnikania wody pod ciśnieniem oraz wzrost odporności na działanie mrozu, a więc poprawa trwałości. Było to spowodowane, podobnie jak w przypadku wytrzymałości, zastosowaniem do produkcji betonu cementu hutniczego, co jest zgodne z danymi literaturowymi (1, 17, 18). Jest to korzystny wpływ mielonego granulowanego żużla wielkopieczowego na mikrostrukturę twardniejącego zaczynu cementowego, po dłuższym okresie.

Dlatego też w niektórych specyfikacjach technicznych badania związane z trwałością betonu wykonuje się w czasie równoważnym pod względem wytrzymałości w stosunku do 28 dni twardnienia cementu portlandzkiego CEM I (20). W porównaniu do cementu portlandzkiego, w przypadku cementów z dodatkami mineralnymi o dużym przyroście wytrzymałości po 28 dniach, zaleca się badania trwałości co najmniej po 56 dniach twardnienia.

4. Wnioski

Doświadczenia pokazują, że dodatek domieszki napowietrzającej AirPak zmniejsza wytrzymałość cementów o jedną klasę. Bardzo małe zmiany wytrzymałości wykazuje tylko cement CEM II/B-S. Zmiany wytrzymałości cementu napowietrzającego należy uwzględnić przy projektowaniu klasy betonu mrozoodpornego.

Wyniki doświadczeń wykazują, że cementy napowietrzające zapewniają prawidłowe i zgodne z normami napowietrzenie betonu. Badania były przeprowadzone tylko z jedną domieszką napowietrzającą – AirPak. Potwierdzono więc, że stosowanie cementów napowietrzających pozwala na uzyskanie betonu mrozoodpornego, o wymaganym napowietrzeniu i strukturze porów.

Badania przeprowadzone w skali poligonowej wykazały dobrą trwałość napowietrzenia mieszanki betonowej oraz niewielki spadek

after at least 56 days of hardening for cements with mineral additions, for which high increase of strength after 28 days is typical, unlike as for Portland cement.

4. Conclusions

Research results showed that addition of AirPak air entraining agent reduces cement strength of one class. Only CEM II/B-S has very low variations in strength. Strength decrease of the air entrainment cement should be considered during designing a frost resistant cement class.

The experimental results show that use of air entraining cements ensure suitable air entrainment of concrete, fulfilling the standard requirements. The tests were carried out with one admixture – AirPak. Thus it was confirmed that the usage of air entraining cements allows to manufacture the frost resistant concrete of suitable air entraining and pores structure.

The field tests showed a stable air entraining of concrete mix and only a slight decrease of fresh concrete consistency with time. The concrete air entrainment structure, examined using AVA method, was suitable from the viewpoint of concrete frost resistance. The confirmation of suitable air entraining was the positive results of hardened concrete frost resistance testing, carried using standard method [F150] and in the presence of de-icing salt as well.

konsystencji świeżego betonu w czasie. Struktura napowietrzenia mieszanki, zbadana metodą AVA, była prawidłowa z punktu widzenia odporności betonu na działanie mrozu. Potwierdzeniem uzyskania właściwej charakterystyki napowietrzenia były dobre wyniki badań odporności stwardniałego betonu na działanie mrozu, wykonane zarówno metodą zwykłą [F150], jak i przy dodatku soli odladzającej.

Literatura / References

1. A. Neville, Właściwości betonu, V edycja, s. 931, Wydawnictwo Polski Cement, Kraków 2012.
2. Z. Rusin, Technologia betonów mrozoodpornych, s. 182, Wydawnictwo Polski Cement, Kraków 2002.
3. A. M. Glinicki, Trwałość betonu w nawierzchniach drogowych. Wpływ mikrostruktury, projektowanie materiałowe, diagnostyka, s. 286, Wydawnictwo Instytutu Badawczego Dróg i Mostów, Warszawa 2011.
4. K. Kjellsen, E. Atlasi, „Pore structure of cement silica fume system – Presence of hollow-shell pores”, *Cem. Concr. Res.*, **29**, 133 (1999).
5. S. Chładzyński, A. Garbacik, Cementy wieloskładnikowe w budownictwie, s. 125, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2008.
6. J. Jasiczak, P. Mikołajczyk, Technologia betonu modyfikowanego domieszkami i dodatkami. Przegląd tendencji krajowych i zagranicznych. Politechnika Poznańska, Poznań 1997.
7. B. Persson, „Internal frost resistance and salt frost scaling of self-compacting concrete”, *Cem. Concr. Res.*, **33**, 373 (2003).
8. J. Wawrzeńczyk, Diagnostyka mrozoodporności betonu cementowego. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, Kielce 2002.
9. Z. Giergiczny, Popiół lotny w składzie cementu i betonu, s.189, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
10. Guide to durable concrete. Reported by ACI Committee 201, *ACI Journal*, **74**, 573 (1979).
11. ASTM C 150-04 Standard Specification for Portland Cement.
12. ASTM C 595-03 Standard Specification for Blended Hydraulic Cements.
13. EN 480-11:2008 Admixtures for concrete, mortar and grout. Test methods. Determination of air void characteristics in hardened concrete.
14. U. H. Jakobsen, C. Pade, N. Thaulow, D. Brown, S. Sahu, O. Magnusson, S. De Buck, G. De Schutter, „Automated air void analysis of hardened concrete – a Round Robin study”, *Cem. Concr. Res.*, **36**, 1444 (2006).
15. Danish standard DS2426 Concrete - Materials - Rules for application of EN 206-1 in Denmark.
16. Beton-Teil1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis (Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206-1).
17. Z. Giergiczny, J. Małolepszy, J. Szwabowski, J. Śliwiński, Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji, Wydawnictwo Instytut Śląski, Opole 2002.
18. Z. Giergiczny, T. Baran, M. Najduchowska, M. Ostrowski, „Cements for frost resistant concrete”, 14 th ICCO, Pekin 2015.
19. Nowe Ogólne Specyfikacje Techniczne (OST) Wzorcowe Dokumenty Kontraktowe (WDK) dla systemów: tradycyjnego, „Projektuj i buduj” oraz „Utrzymaj standard” D-05.03.04 Nawierzchnia betonowa (www.gddkia.gov.pl).