

MARIUSZ DĄBROWSKI¹⁾MICHAŁ A. GLINICKI²⁾

AIR VOID SYSTEM PARAMETERS AND FROST RESISTANCE OF AIR-ENTRAINED CONCRETE CONTAINING CALCAREOUS FLY ASH

CHARAKTERYSTYKA PORÓW POWIETRZNYCH I MROZODPORNOŚĆ BETONÓW NAPOWIETRZONYCH Z POPIOŁEM LOTNYM WAPIENNYM

STRESZCZENIE. Przedstawiono wyniki badań charakterystyki porów oraz odporności na cykliczne zmrzanie i rozmrażanie betonów napowietrzonych z popiołem lotnym wapiennym. Badania mrozoodporności przeprowadzono w obecności środków odladzających (odporność na powierzchniowe łuszczenie) oraz bez środków odladzających. Zakres badań obejmował betony napowietrzane o $w/b=0,45$ z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego oraz betony z cementów wieloskładnikowych, zawierających popiół lotny wapienny (W), a także popiół lotny krzemionkowy (V) i granulowany żużel wielkopiecowy (S). Zastosowano dwa rodzaje kruszyw do betonu: grys granodiorytowy i grys wapienny. Określono charakterystykę porów powietrznych w betonie metodą mikroskopowej analizy obrazu i przeanalizowano efekty stosowania popiołów lotnych wapiennych. Przeanalizowano także wpływ wieku betonu i obecności popiołu lotnego W na wytrzymałość i mrozoodporność betonu. Z badań wynika, że zastosowanie popiołu lotnego wapiennego jako składnika głównego cementów wieloskładnikowych nie pogarsza odporności betonu na powierzchniowe łuszczenie w obecności soli odladzających, jak i mrozoodporności wewnętrznej, pod warunkiem właściwego napowietrzenia betonu.

SŁOWA KLUCZOWE: cementy wieloskładnikowe, charakterystyka porów powietrznych, mrozoodporność, odporność na powierzchniowe łuszczenie, popiół lotny wapienny.

ABSTRACT. The paper presents results of the investigation of the air void characteristics and the resistance to cyclic freezing and thawing of air-entrained concrete containing calcareous fly ash. The frost resistance was tested also under the presence of de-icing salts to check the resistance to frost-salt scaling and without de-icing salts. The range of investigation included air entrained concrete mixes with the specified water-binder ratio of $w/b=0.45$ with addition of calcareous fly ash or made using blended cements with calcareous fly ash (W), and also siliceous fly ash (V) and ground granulated blast-furnace slag (S). The coarse aggregates used were crushed granodiorite and crushed limestone. The air-void system parameters were determined by microscopic image analysis and the effect of addition of calcareous fly ash was assessed. The effect of concrete age and presence of fly ash W on the strength and freeze-thaw resistance was also studied. The tests have shown that the use of calcareous fly ash as one of the main constituents of blended cements does not affect the frost salt scaling resistance nor the resistance to internal frost damage provided that the air void system is adequate.

KEYWORDS: air-void system parameters, blended cements, calcareous fly ash, freeze-thaw resistance, scaling resistance.

DOI: 10.7409/rabdim.013.004

¹⁾ Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie; mdabrow@ippt.pan.pl (✉)

²⁾ Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN oraz Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie; mglinic@ippt.pan.pl

1. WPROWADZENIE

Trwałość betonu w warunkach agresji mrozu, a także środków odladzających, jest jednym z podstawowych warunków przydatności do budowy obiektów infrastruktury komunikacyjnej. Zagadnienia trwałości betonu z popiołami lotnymi były przedmiotem licznych badań w odniesieniu do popiołów lotnych krzemionkowych (V) np. [1], [2] i stąd wynikają zalecenia dużej ostrożności w stosowaniu popiołów w betonach eksponowanych na agresję w klasach ekspozycji XF2 - XF4, zdefiniowanych w normie PN-EN 206-1. Możliwości wykorzystania popiołów lotnych wapiennych w betonie są znacznie mniej rozpoznane, pomimo dużej dostępności takich popiołów w wielu krajach, również w Polsce. Zasadniczą różnicą w składzie chemicznym popiołów W w porównaniu z popiołami V jest podwyższona zawartość związków wapnia w przeliczeniu na CaO (10-40%) oraz jonów SO_3 (do 7%). Morfologia ziaren popiołu W jest zróżnicowana: oprócz ziaren kulistych występują liczne aglomeraty ziaren o znacznej porowatości, wpływające na podwyższenie wodożądności spoiwa. Niedawno podjęte badania w ramach projektu POIG zaowocowały szczegółowym rozpoznaniem właściwości krajowych popiołów lotnych wapiennych [3], [4]. Na tej podstawie wytypowano popioły lotne z Elektrowni Bełchatów jako popioły o największym potencjale zastosowań jako składnik główny cementu i dodatek do betonu.

Nieliczne opublikowane prace dotyczyły zagadnień mrozoodporności betonu z popiołem lotnym wapiennym. W kilku pracach opublikowanych w latach dziewięćdziesiątych wykazano dobrą odporność betonów z popiołem lotnym W na cykliczne zamrażanie i odmrażanie. W pracy Yazici [5] wykazano korzystny wpływ dodatku popiołów lotnych wapiennych od 30% do 60% na mrozoodporność wewnętrzną betonów nienapowietrzonych. Negatywny wpływ popiołu lotnego W na mrozoodporność betonów nienapowietrzonych stwierdzono w [4]. Pigeon i inni [6] w swoich badaniach udowodnili, że wraz ze wzrostem zawartości popiołu w betonie zwiększony wpływ na mrozoodporność powierzchniową ma odpowiednia mikrostruktura porów i pielęgnacja powierzchni betonu. Znany sposób uzyskania mikrostruktury zapewniającej mrozoodporność betonu jest właściwe napowietrzenie betonu. Poprzez właściwe napowietrzenie [7] rozumie się wprowadzenie do betonu równomiernie rozmieszczonych, drobnych pęcherzyków powietrza, które są rozmieszczone dostatecznie blisko siebie, aby kompensować naprężenia powstające wskutek przyrostu objętości wody w kapilarach w wyniku zamrażania. Napowietrzanie

1. INTRODUCTION

The resistance to the aggressive action of frost and de-icing salts is one of the main criteria used in evaluating the suitability of concrete for use in transport infrastructure projects. A number of investigations including [1], [2] have been carried out to check the effect of siliceous fly ash on the performance parameters of concrete and as a result a very conservative approach has been recommended when specifying mixes containing fly ash for exposure classes XF2 to XF4, as defined in PN-EN 206-1. Far less attention has been paid to calcareous fly ash (W), although it is a readily available material in many countries, including Poland. In terms of the chemical composition the W-type fly ash differs from the V-type fly ash primarily because of an increased content of reactive CaO (10% to 40%) and SO_3 ions (up to 7%). The morphology of W-type fly ash is variable, and thus, alongside with spherical particles there are also highly porous agglomerates, which significantly increase the water demand. Recently a research project in the framework of European Regional Development Fund was undertaken and detailed information on the properties of calcareous fly ash available in Poland was provided in [3], [4]. On this basis fly ash generated in Bełchatów Power Plant was identified to be the most suitable for possible use in cement and concrete production.

There are only a few publications on the freeze-thaw resistance of concrete containing calcareous fly ash. Good freeze-thaw performance of concrete containing W-type fly ash was claimed in a few research reports published in the 1990s. According to Yazici [5], calcareous fly ash added at a rate of between 30% and 60% improves the resistance of non-air-entrained concrete to internal damage due to freeze-thaw cycling. This, however, is contrary to the findings described in [4], namely that the addition of W-type fly ash has an adverse effect on the freeze-thaw resistance of non-air-entrained concrete. Pigeon et al. [6] have demonstrated that with the increasing content of fly ash the scaling resistance becomes more and more dependent on appropriate microstructure and adequate curing of the concrete surface. The air-entrainment process is one of the well known techniques used to obtain the desired microstructure of frost resistant concrete. The process of air-entrainment is considered effective [7] if it results in obtaining fine bubbles of air uniformly distributed throughout concrete, spaced densely enough to enable accommodation of stresses resulting from the increase of volume of water in the capillary pores during

betonu z popiołami lotnymi jest dość kłopotliwe z uwagi na podwyższoną niestabilność układu pęcherzyków powietrza oraz konieczność zwiększenia zawartości domieszki napowietrzającej, na ogół proporcjonalnie do zawartości niespalonego węgla (strat prażenia) w popiołach [8-10]. Wcześniejsze badania betonów napowietrzonych przeprowadzone przez autorów [11] wykazały, że zawartość powietrza w mieszankach betonowych z dodatkiem popiołów lotnych wapiennych zmniejsza się ze wzrostem powierzchni właściwej popiołów według zależności zbliżonej do liniowej. Stwierdzono również, że wraz ze wzrostem ilości dodatku popiołu lotnego wapiennego wzrasta zapotrzebowanie na ilość domieszki napowietrzającej, nawet od 5 do 12-krotnie. Porównanie zawartości powietrza w mieszance betonowej i zawartości porów w betonie stwardniałym wykazało negatywny wpływ dodatku popiołu W na stabilność pęcherzyków powietrza – zanotowano redukcję zawartości powietrza sięgającą od 25% do 60% początkowej wartości, przy czym ucieczka pęcherzyków powietrza dotyczyła przede wszystkim porów powietrznych o dużych średnicach. Powyższe spostrzeżenia okazały się przydatne do modyfikacji sposobu projektowania napowietrzonych mieszanek betonowych zawierających popiół lotny wapienny.

Celem podjętych badań była ocena wpływu dodatku popiołu lotnego wapiennego na mikrostrukturę porów w betonach napowietrzonych, na mrozoodporność wewnętrzną i odporność na powierzchniowe łuszczenie wskutek oddziaływania mrozu i środków odladzających. Zakres badań objął betony wykonane z popiołem lotnym wapiennym, stosowanym jako dodatek do mieszanki betonowej oraz betony wykonane z cementów wieloskładnikowych, w których jednym ze składników głównych był popiół lotny W.

2. PROGRAM BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

2.1. MATERIAŁY DO BADAŃ

Do wykonania betonów użyto następujących materiałów:

- popiół W pochodzący z Elektrowni Bełchatów, którego skład chemiczny, oznaczony metodą fluorescencji rentgenowskiej, przedstawiono w Tablicy 1 (wyniki uzyskane w ICiMB, Oddział w Krakowie) [12],
- cementy wieloskładnikowe wykonane przez wspólny przemiał klinkieru portlandzkiego, regulatora czasu wiązania oraz innych składników głównych podanych w Tablicy 2 (wyniki uzyskane w ICiMB, Oddział w Krakowie),

freezing. Use of fly ash makes the process of air-entrainment more challenging as it affects the stability of the air-void system and requires increasing the amount of the air-entraining agent, generally in proportion to the content of unburned coal present in the ash [8-10]. Previous research [11] resulted in an established relationship, close to linear relationship, between the decrease in the air content in the mixes containing calcareous fly ash and the increase of specific surface of ash particles. Moreover, with the increasing content of calcareous fly ash the amount of air-entraining admixture had to be increased accordingly, sometimes even by 5 to 12 times. A comparison of the air content in the mix and in the hardened concrete revealed a negative influence of W-type fly ash on the stability of the air-void system; the total air content was decreased by 25% to 60% and the escape of air bubbles from the mix concerned mainly bubbles greater in diameter. The above observations were used with good effect for modifying the design method of air-entrained concrete mixes containing calcareous fly ash.

The purpose of the current research was to evaluate the effect of calcareous fly ash on the air-void system in air-entrained concrete and on the internal frost resistance and de-icing salt scaling resistance. The investigation included concrete manufactured using calcareous fly ash as a mix additive or introduced as one of the main constituents of blended cements.

2. TESTING PROGRAM

2.1. MATERIALS

The specimens were prepared using the following materials:

- W-type fly ash obtained from Bełchatów Power Plant; its chemical composition determined with the XRF method is presented in Table 1 (courtesy of ICMB of Kraków) [12],
- blended cements produced by grinding Portland cement clinker together with set-control admixture and other main constituents listed in Table 2 (courtesy of ICMB of Kraków),
- Portland cement CEM I 42.5R,
- 0-2 mm quartz sand,
- 2-8 mm and 8-16 mm crushed granodiorite (for the properties see Table 3),
- 2-8 mm and 8-16 mm crushed limestone (for the properties see Table 3),

- cement portlandzki CEM I 42,5R,
- piasek kwarcowy 0-2 mm,
- grys granodiorytowy frakcji 2-8 mm i 8-16 mm (właściwości podano w Tablicy 3),
- grys wapienny frakcji 2-8 mm i 8-16 mm (właściwości podano w Tablicy 3),
- domieszki do betonu: superlastyfikatory (SP) oraz domieszka napowietrzająca (DN).

Według normy PN-EN 197-1, w składzie cementu CEM V nie przewiduje się zastosowania popiołu lotnego wapiennego – oznaczenie cementu jest więc w cudzysłowie.

- admixtures for concrete: superplasticizer (SP) and air-entraining agent (DN).

According to PN-EN 197-1, calcareous fly ash is not included in the defined composition of CEM V cements. Therefore such cement designation is used in brackets.

Table 1. Chemical composition of calcareous fly ash from Bełchatów Power Plant
Tablica 1. Skład chemiczny popiołu lotnego wapiennego z Elektrowni Bełchatów

| Loss on ignition Strata prażenia | Component content / Zawartość składnika [%] | | | | | | | | |
|-------------------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|------------------|-------------------|------------------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | CaO _w |
| 2.12 | 40.88 | 19.00 | 4.25 | 25.97 | 1.73 | 3.94 | 0.14 | 0.13 | 1.07 |

Table 2. Composition and physical properties of blended cements
Tablica 2. Skład i właściwości fizyczne cementów wieloskładnikowych

| Type of cement Rodzaj cementu | Component content / Zawartość składnika [%] | | | | | Specific gravity Gęstość [g/cm ³] | Surface area (Blaine) Powierzchnia właściwa według Blaine'a [cm ² /g] | SO ₃ content Zawartość SO ₃ [% (m/m)] |
|----------------------------------|---|---|-----------------------------|-------------------|----------------|--|---|--|
| | Clinker Klinkier | Calcareous fly ash W Popiół lotny wapienny W | Fly ash V Popiół lotny V | Slag S Żużel S | Gypsum Gips | | | |
| CEM I | 94.5 | – | – | – | 5.5 | 3.10 | 3 850 | 2.82 |
| CEM II/A-W | 80.9 | 14.3 | – | – | 4.8 | 3.05 | 3 850 | 3.11 |
| CEM II/B-W | 67.4 | 28.9 | – | – | 3.7 | 2.98 | 3 750 | 3.13 |
| CEM II/B-M (V-W) | 66.6 | 14.3 | 14.3 | – | 4.8 | 2.93 | 3 750 | 3.13 |
| CEM II/B-M (S-W) | 66.6 | 14.3 | – | 14.3 | 4.8 | 3.03 | 3 750 | 3.33 |
| “CEM V/A (S-W)” | 47.9 | 23.9 | – | 23.9 | 4.2 | 2.97 | 3 800 | 3.33 |

Table 3. Physical properties of coarse aggregates
Tablica 3. Właściwości fizyczne kruszywa grubego

| Component / Składnik | Specific gravity / Gęstość [g/cm ³] | Porosity / Porowatość [%] | Absorption / Nasiąkliwość [%] |
|----------------------------|---|---------------------------|-------------------------------|
| Granodiorite / Granodioryt | 2.68 | 1.10 | 0.32 |
| Limestone / Wapień | 2.70 | 2.10 | 0.30 |

2.2. SKŁAD MIESZANEK BETONOWYCH

Zaprojektowano trzy serie mieszank betonowych napowietrzonych o jednakowej zawartości spoiwa 340 kg/m³ i wody 153 kg/m³ (stosunek $w/b=0,45$) oraz konsystencji

2.2. CONCRETE MIX DESIGN

Three series of air-entrained concrete mixes were designed at the same content of binder 340 kg/m³ and water 153 kg/m³ (the water to binder ratio $w/b=0.45$) and the

klasy S2. Projektowana zawartość powietrza w mieszankach wynosiła 6-7,5% z uwagi na spodziewany ubytek pęcherzyków powietrza w mieszankach zawierających popiół lotny wapienny [11].

W serii oznaczonej Z stosowano popiół lotny W jako zamiennik 30% masy cementu w spoiwie, przy czym wykorzystano trzy rodzaje popiołu: w postaci nieprzetworzonej (popiół pobrany ze zbiornika pod elektrofiltrem), popiół zmielony albo przesiany przez sito 125 μm . Właściwości fizyczne popiołów, łącznie z wynikami analizy granulometrycznej za pomocą urządzenia Malvern Mastersizer 2000, podano w Tablicy 4. Mielenie miało na celu zwiększenie aktywności popiołu lotnego wapiennego poprzez zwiększenie powierzchni reakcji oraz rozbięciu aglomeratów ziaren. Odrzucenie frakcji powyżej 125 μm miało na celu usunięcie dużych aglomeratów ziaren, zwłaszcza porowatych ziaren niespalonego węgla wraz z obojętnymi chemicznie dużymi ziarnami kwarcu (pozostałość na sicie 125 μm stanowiła około 4% masy popiołu).

consistency class S2. The total air content in fresh concrete was specified at 6-7.5% to allow for the expected escaping of air bubbles in the mixes containing W-type fly ash [11].

In the series designated Z the following three types of calcareous fly ash were used, substituting 30% of the cement content by weight: unprocessed (taken from the ESP tank), ground and sieved through 125 μm sieve. The physical properties of fly ash, including particle size distribution determined with Malvern Mastersizer 2000, are given in Table 4. The purpose of grinding was to activate the hydraulic properties of W-type fly ash by increasing the reactive surface and disintegrating agglomerations. The plus 125 μm ash fraction was screened out in order to remove larger agglomerations, especially those made up of porous particles of unburned coal together with chemically inert large quartz particles (ca. 4% of the total weight was retained on the 125 μm sieve).

Table 4. Physical properties of calcareous fly ash from Bełchatów Power Plant used as an additive to concrete
Tablica 4. Właściwości fizyczne popiołu lotnego wapiennego z Elektrowni Bełchatów, stosowanego jako dodatek do betonu

| Type of fly ash Rodzaj popiołu | Specific gravity Gęstość [g/cm ³] | Fineness Miałkość [%] | Surface area (Blaine) Powierzchnia właściwa według Blaine'a [cm ² /g] | Granulometric analysis Analiza granulometryczna | |
|---|---|-----------------------------|---|--|--|
| | | | | <i>d</i> (0.5) ^{**} [μm] | <i>d</i> (0.9) ^{***} [μm] |
| Without processing / Nieprzetwarzany | 2.60 | 46 | 2 400 | 63 | 219 |
| Ground / Mielony | 2.67 | 21 | 3 500 | 30 | 89 |
| Przesiany / Sieved ^{*)} | nb | 43 | nb | 41 | 108 |
| Remarks / Uwagi | | | | | |
| ^{*)} particle size < 125 μm / ziarna poniżej 125 μm , nb – not tested / nie badano | | | | | |
| ^{**)} particle size limit representative for 50% of particle volume / wielkość ziarna, poniżej której występuje 50% objętości popiołu | | | | | |
| ^{***)} particle size limit representative for 90% of particle volume / wielkość ziarna, poniżej której występuje 90% objętości popiołu | | | | | |

W dwóch seriach oznaczonych G i L zastosowano cementy portlandzkie wieloskładnikowe i cement wieloskładnikowy „CEM V/A (S-W)”, zawierające popiół lotny wapienny i inne nieklinkierowe składniki główne zgodnie z Tablicą 2. Serie różniły się rodzajem stosowanego kruszywa grubego: odpowiednio granodiorytowego oraz wapiennego. Poprzez zróżnicowanie kruszyw zakres badań objął odpowiednio kruszywo ze zwartej skały magmowej oraz kruszywo ze skały osadowej, podatnej na reakcję

Blended cements containing calcareous fly ash and other constituents as per Table 2 were used for preparation of two series of specimens designated G and L, standing for granodiorite and limestone respectively. The purpose of this differentiation was to include in the research both an example of dense igneous rock and an example of sedimentary rock, of which the latter is more prone to react with the cement paste. Concrete mix design is presented in Table 5.

z zaczynem cementowym. Skład zaprojektowanych mieszanek betonowych przedstawiono w Tablicy 5.

Table 5. Composition of air-entrained concrete mixes
Tablica 5. Skład mieszanek betonowych napowietrzonych

| Designation Oznaczenie | Content of components in concrete mixture / Zawartość składnika w mieszance betonowej [kg/m ³] | | | | | | | | | | |
|---------------------------|--|-------------|--|--------------------------|---|-----|---|-----|---------------|---|------|
| | Cement ^{*)} 340 kg/m ³ | CEM I 42.5R | Calcerous fly ash Popiół lotny wapienny | Sand Piasek 0-2 mm | Granodiorite Granodioryt 2-8 mm 8-16 mm | | Limestone Wapień 2-8 mm 8-16 mm | | Water Woda | Admixtures Domieszki ^{**)} SP DN | |
| Z-0 | – | 340 | – | 598 | 607 | 602 | – | – | 153 | 0.3 | 0.06 |
| ZN-30 | – | 238 | 102 ^{N)} | 592 | 601 | 596 | – | – | 153 | 1.7 | 0.20 |
| ZM-30 | – | 238 | 102 ^{M)} | 592 | 601 | 596 | – | – | 153 | 0.5 | 1.14 |
| ZP-30 | – | 230 | 102 ^{P)} | 592 | 601 | 596 | – | – | 153 | 3.1 | 0.18 |
| GW-0 | CEM I | – | – | 598 | 607 | 602 | – | – | 153 | 0.4 | 0.17 |
| GW-15 | CEM II/A-W | – | – | 598 | 607 | 602 | – | – | 153 | 1.0 | 0.23 |
| GW-30 | CEM II/B-W | – | – | 598 | 607 | 602 | – | – | 153 | 1.2 | 0.60 |
| GWV-30 | CEM II/B-M (V-W) | – | – | 598 | 607 | 602 | – | – | 153 | 0.9 | 0.30 |
| GWS-30 | CEM II/B-M (S-W) | – | – | 598 | 607 | 602 | – | – | 153 | 0.5 | 0.35 |
| GWS-50 | „CEM V/A (S-W)” | – | – | 598 | 607 | 602 | – | – | 153 | 1.1 | 0.38 |
| LW-0 | CEM I | – | – | 605 | – | – | 625 | 578 | 153 | 0.7 | 0.12 |
| LW-15 | CEM II/A-W | – | – | 605 | – | – | 625 | 578 | 153 | 1.2 | 0.25 |
| LW-30 | CEM II/B-W | – | – | 605 | – | – | 625 | 578 | 153 | 1.7 | 0.65 |
| LWV-30 | CEM II/B-M (V-W) | – | – | 605 | – | – | 625 | 578 | 153 | 1.5 | 0.40 |
| LWS-30 | CEM II/B-M (S-W) | – | – | 605 | – | – | 625 | 578 | 153 | 1.0 | 0.35 |
| LWS-50 | „CEM V/A (S-W)” | – | – | 605 | – | – | 625 | 578 | 153 | 1.5 | 0.60 |

Remarks / Uwagi

^{*)} type of cement according to Table 2 / rodzaj cementu zgodnie z Tablicą 2

^{**)} SP – superplasticizer / superplastyfikator, DN – air-entraining admixture / domieszka napowietrzająca

^{N)} without processing / nieprzetwarzany, ^{M)} ground / mielony, ^{P)} sieved / przesiany

Mieszanki wykonano w mieszarce laboratoryjnej. Wykonano próbki sześciennie o boku 100 mm, próbki sześciennie o boku 150 mm oraz prostopadłościennie o wymiarach 100 × 100 × 500 mm, odpowiednio do badań wytrzymałości na ściskanie, badań odporności na powierzchniowe łuszczenie w obecności soli odladzających i określenia charakterystyki porów powietrznych oraz do badania mrozoodporności wewnętrznej. Próbki dojrzewały w normowych warunkach stałej temperatury (20°C±2°C) w wodzie przez 28 i 90 dni.

2.3. METODY BADAŃ

Właściwości mieszanki betonowej oznaczono następującymi metodami:

The mixes were produced in a laboratory concrete mixer. The following specimens were cast: 100 mm cubes to be used for compressive strength test, 150 mm cubes to be used for frost salt scaling resistance and the air void characteristics testing and 100 × 100 × 500 mm prisms to be used for internal frost resistance testing. The specimens were conditioned in standard conditions under controlled temperature (20°C±2°C) in water for 28 and 90 days.

2.3. TESTING PROCEDURES

The following methods were used to determine the properties of concrete mixes:

- air content using a pressure method according to PN-EN 12350-7,

- zawartość powietrza metodą ciśnieniową zgodnie z PN-EN 12350-7,
- konsystencja metodą opadu stożka według normy PN-EN 12350-2,
- gęstość objętościowa według normy PN-EN 12350-6.

Mikrostrukturę porów powietrznych i właściwości betonu określono poprzez:

- charakterystykę porów powietrznych – zgodnie z PN-EN 480-11; pomiary parametrów mikrostruktury porów powietrznych wykonano za pomocą komputerowego systemu automatycznej analizy obrazu,
- wytrzymałość na ściskanie – zgodnie z PN-EN 12390-3,
- odporność na powierzchniowe łuszczenie – zgodnie z PKN-CEN/TS 12390-9, metoda *slab test*,
- mrozoodporność wewnętrzną – zgodnie z CEN/TR 15177.

W odróżnieniu od powszechnie stosowanej w Polsce metody zgodnej z PN-B-06250, do oceny mrozoodporności wewnętrznej wykorzystano moduł sprężystości betonu, a nie ubytek wytrzymałości lub ubytek masy. Dynamiczny moduł sprężystości został oznaczony metodą rezonansową za pomocą urządzenia GrindoSonic MK200 zgodnie z normą ASTM C 215-08, zarówno przed rozpoczęciem cyklicznego zamrażania-rozmrażania, jak też po 100 i 150 cyklach.

3. WYNIKI BADAŃ I ANALIZA

Wyniki oznaczenia parametrów mikrostruktury porów powietrznych w betonie oraz właściwości mieszanki betonowej zostały przedstawione w Tablicy 6. We wszystkich zaprojektowanych mieszankach zawartość powietrza, oznaczona metodą ciśnieniową, wynosiła od 6,4% do 7,5%, niezależnie od składu mieszanki. Znacząco zmieniła się natomiast zawartość domieszki napowietrzającej (Tabl. 5), niezbędnej do uzyskania projektowanego napowietrzenia. W stosunku do mieszanki referencyjnej (bez popiołu), przy stosowaniu popiołu lotnego wapiennego jako dodatku do betonu w formie nieprzetworzonej i po przesianiu, zawartość domieszki napowietrzającej była 3 razy większa, natomiast w przypadku popiołu mielonego aż 18 razy większa. W przypadku cementów wieloskładnikowych wzrost zapotrzebowania na domieszkę napowietrzającą był proporcjonalny do wzrostu zawartości popiołu lotnego W w składzie cementu (Tabl. 5).

- consistency – slump cone test according to PN-EN 12350-2,
- apparent density according to PN-EN 12350-6.

The following methods were used to determine microstructure parameters of the entrained air-void system and the properties of hardened concrete:

- air void characteristics according to PN-EN 480-11; the characteristics of the entrained air-void system were determined by automatic image analysis,
- compressive strength – according to PN-EN 12390-3,
- scaling resistance – slab test method according to PKN-CEN/TS 12390-9,
- resistance to internal damage under freeze-thaw cycling – according to CEN/TR 15177.

The resistance to internal damage was assessed using the resonant elastic modulus, other than in the method commonly used in Poland and defined in PN-B-06250 where the strength loss or loss of weight are used as the evaluation criteria. The dynamic modulus of elasticity was determined with GrindoSonic MK200 tester by impulse excitation of resonant vibration technique according to ASTM C 215-08 at three stages of expected degradation: before freeze-thaw cycling, after 100 cycles and after 150 cycles.

3. PRESENTATION AND ANALYSIS OF THE TEST RESULTS

The established characteristics of the entrained air-void system in hardened concrete and the concrete mix properties are presented in Table 6. In all the designed mixes the total air content, determined with the pressure method, ranged from 6.4% to 7.5% and did not depend on the mix design. This was not the case with the demand for the air-entraining agent required to obtain the desired content of entrained air, which varied strongly depending on the mix design (Table 5). It was respectively: three times higher for the mix containing unprocessed and sieved W-type fly ash and even eighteen times higher for the mix containing ground W-type fly ash, as compared to the reference mix (produced without any additions). For the mixes containing blended cements the demand for the air-entraining agent increased proportionally to the content of W-type fly ash in the blend.

Table 6. Properties of concrete mixture and quantitative characteristics of air voids in hardened concrete (A – the total volume of air voids, α – the specific surface area of air voids, \bar{L} – the spacing factor, A_{300} – the content of micropores)
 Tablica 6. Właściwości mieszanki betonowej oraz ilościowa charakterystyka porów powietrznych w betonie (A – całkowita zawartość powietrza, α – powierzchnia właściwa porów, \bar{L} – wskaźnik rozmieszczenia porów, A_{300} – zawartość mikroporów)

| Designation / Oznaczenie | A [%] | α [mm ⁻¹] | \bar{L} [mm] | A_{300} [%] | $P^*)$ [%] | Slump / Opad stożka [mm] | Density / Gęstość [kg/m ³] | A/P [%] |
|---|------------|---------------------------------|-------------------|------------------|---------------|-----------------------------|---|--------------|
| Z-10 | 3.70 | 27.31 | 0.20 | 1.69 | 6.5 | 60 | 2 371 | 57 |
| ZN-30 | 5.45 | 20.93 | 0.23 | 2.15 | 6.5 | 80 | 2 359 | 84 |
| ZM-30 | 3.75 | 36.86 | 0.15 | 2.50 | 6.5 | 70 | 2 365 | 58 |
| ZP-30 | 4.26 | 21.83 | 0.24 | 1.27 | 7.0 | 100 | 2 350 | 61 |
| GW-0 | 5.86 | 32.97 | 0.14 | 3.09 | 6.5 | 60 | 2 277 | 90 |
| GW-15 | 6.68 | 23.80 | 0.17 | 2.63 | 7.4 | 100 | 2 299 | 90 |
| GW-30 | 6.80 | 24.14 | 0.16 | 2.99 | 7.2 | 60 | 2 295 | 94 |
| GWV-30 | 5.03 | 33.40 | 0.14 | 2.91 | 7.0 | 50 | 2 292 | 72 |
| GWS-30 | 4.08 | 31.56 | 0.17 | 2.53 | 7.5 | 50 | 2 295 | 54 |
| GWS-50 | 6.48 | 26.28 | 0.16 | 3.04 | 6.8 | 40 | 2 295 | 95 |
| LW-0 | 8.37 | 34.20 | 0.09 | 5.02 | 7.0 | 80 | 2 290 | 120 |
| LW-15 | 3.89 | 25.59 | 0.21 | 2.11 | 6.8 | 110 | 2 296 | 57 |
| LW-30 | 4.58 | 29.01 | 0.17 | 2.29 | 6.8 | 80 | 2 276 | 67 |
| LWV-30 | 5.78 | 23.35 | 0.19 | 2.57 | 6.6 | 110 | 2 291 | 88 |
| LWS-30 | 6.62 | 28.67 | 0.14 | 3.34 | 7.0 | 110 | 2 291 | 95 |
| LWS-50 | 5.56 | 30.49 | 0.15 | 2.63 | 6.4 | 80 | 2 296 | 87 |
| Remarks / Uwagi | | | | | | | | |
| *) air content – pressure method / zawartość powietrza – metoda ciśnieniowa | | | | | | | | |

Przykładowe obrazy rozmieszczenia i wielkości porów powietrznych w próbkach betonów z 30% dodatkiem popiołu lotnego wapiennego pokazano na Rys. 1. Ilustracje pokazują równomierne rozmieszczenie porów w betonie, brak segregacji, skupisk porów czy innych defektów mikrostruktury [7]. Zróżnicowanie powierzchni właściwej porów α wskazuje tu na korzystny efekt przemiału popiołu.

Uzyskane parametry mikrostruktury porów powietrznych były uzależnione od obecności popiołu lotnego W. W porównaniu do mieszanek referencyjnych (bez dodatku popiołu), obecność popiołu lotnego W powodowała wzrost wskaźnika rozmieszczenia porów \bar{L} , który mieścił się jednak w granicach 0,14-0,24 mm. Wyjątkiem był beton z 30% zawartością dodatku mielonego popiołu W, w którym zaobserwowane zmniejszenie \bar{L} związane było ze znacznym wzrostem powierzchni właściwej porów.

The images in Fig. 1 show some examples of air void distribution and sizes in the specimens of concrete containing 30% of calcareous fly ash. The pictured specimens feature uniform distribution of voids, without segregation, clustering or other microstructure defects [7]. Different values of the specific surface of air voids α were obtained, indicating a beneficial effect of processing of calcareous fly-ash by grinding.

The presence of calcareous fly ash affected the air-void system characteristics. In the mixes containing W-type fly ash the spacing factor \bar{L} was higher than in the reference mixes, yet it did not exceed the range of 0.14-0.24 mm. An exception to that was the mix containing 30% of ground ash W where a reduction of the spacing factor was noted due to a significant increase in the air void specific surface. With hardly any exceptions the specific surface was higher than 23 mm⁻¹ and the spacing factor \bar{L}

W zasadzie we wszystkich przypadkach powierzchnia właściwa porów była większa niż 23 mm^{-1} , a wskaźnik \bar{L} nie większy od $0,21 \text{ mm}$, zatem spełnione były przyjmowane na ogół wymagania określające właściwą charakterystykę porów. Wymagania dotyczące α i \bar{L} były przekroczone tylko w dwóch przypadkach – w betonach z dodatkiem 30% popiołu nieprzetworzonego i przesiewanego. Nie stwierdzono jednoznacznej korelacji charakterystyki porów powietrznych z konsystencją mieszanki lub zawartością powietrza mierzoną metodą ciśnieniową. Nie stwierdzono też związku między ilorazem zawartości powietrza w stwardniałym betonie i zawartości powietrza w mieszance A/P a konsystencją mieszanki lub zawartością popiołu lotnego W.

did not exceed 0.21 mm , thus meeting the commonly accepted criteria for evaluation of entrained air void system. The values of α and \bar{L} exceeded the limits only in the case of two specimens of concrete containing 30% of unprocessed and sieved ash. No clear correlations have been established between the air void system characteristics and the mix consistency or the air content determined with the pressure method. Similarly, no relationship has been found between A/P , i.e. the ratio between the total air content in the fresh and hardened concrete, and the mix consistency or the content of W-type fly ash.

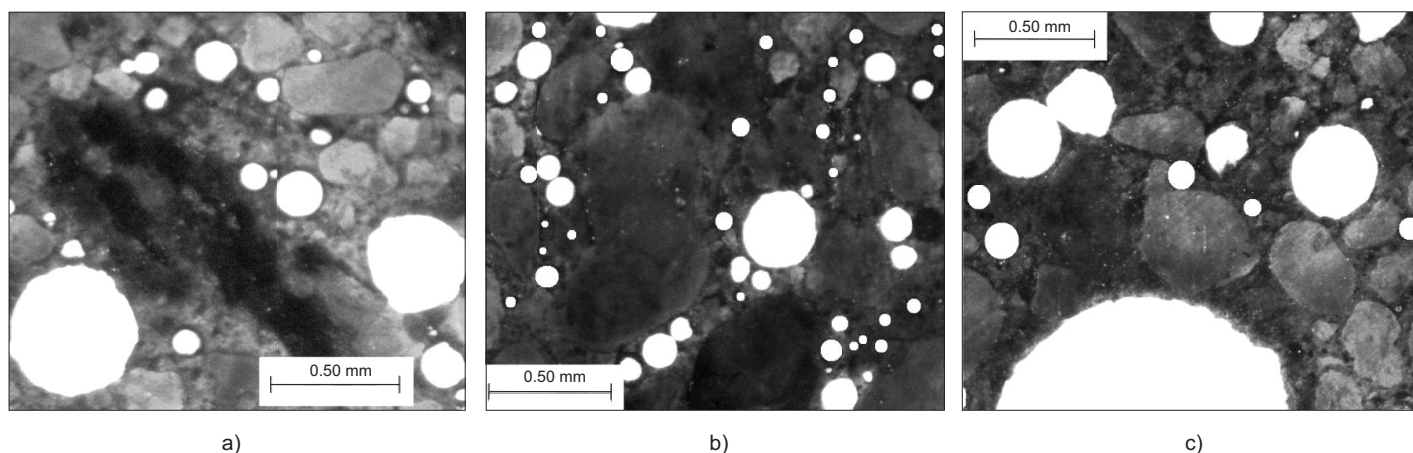


Fig. 1. Examples of images of air voids (white color) visible at the cross-section of concrete specimens: a) ZN-30 ($\alpha = 20.9 \text{ mm}^{-1}$), b) ZM-30 ($\alpha = 36.9 \text{ mm}^{-1}$), c) ZP-30 ($\alpha = 21.8 \text{ mm}^{-1}$)

Rys. 1. Przykładowe obrazy porów powietrznych (kolor biały) widoczne na przekrojach próbek betonów: a) ZN-30 ($\alpha = 20,9 \text{ mm}^{-1}$), b) ZM-30 ($\alpha = 36,9 \text{ mm}^{-1}$) i c) ZP-30 ($\alpha = 21,8 \text{ mm}^{-1}$)

Wytrzymałość na ściskanie betonów napowietrzonych pokazano na Rys. 2. Wytrzymałość betonów referencyjnych (bez dodatku) wynosiła średnio około $48 - 50 \text{ MPa}$ po 28 dniach dojrzewania i nieznacznie więcej po 90 dniach dojrzewania. Obecność popiołu lotnego wapiennego w betonie nie pogorszyła wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania, natomiast poprawiła tę właściwość po wydłużeniu okresu dojrzewania do 90 dni. W przypadku betonu z kruszywem wapiennym i z cementem portlandzkim wapiennym CEM II/A-W, zawierającym 15% popiołu W, wzrost wytrzymałości na ściskanie sięgał 30% w stosunku do betonu referencyjnego. W tym przypadku rolę odgrywały nie tylko właściwości popiołu lotnego W, ale również nieco mniejsza zawartość

For the results of compressive strength testing of air-entrained concrete see Fig. 2. The 28-day compressive strength of reference specimens (concrete without W-type fly ash) was in the range of approximately 48 MPa to 50 MPa and it increased only a little after 90 days of curing. An addition of W-type fly ash did not affect the 28-day compressive strength and increased the compressive strength tested after 90 days of curing. The compressive strength of concrete incorporating limestone aggregate and blended cement with 15% of W-type fly ash was by 30% higher as compared to the reference specimens. This improved performance is attributed not only to the hydraulic properties of W-type fly but also to some reduction of the total air content. Besides, sieving of fly

porów powietrznych. W odniesieniu do wytrzymałości na ściskanie korzystne było stosowanie dodatku popiołu przesianego; dzięki odrzuceniu frakcji powyżej 125 μm uzyskano wytrzymałości większe od kilku (po 28 dniach) do kilkunastu procent (po 90 dniach) w stosunku do betonu bez dodatku popiołu.

ash had an effect on the compressive strength and removal of plus 125 μm ash fraction resulted in an increase of a few percent (tested after 28 days) to over a dozen percent (tested after 90 days) in relation to the reference concrete.

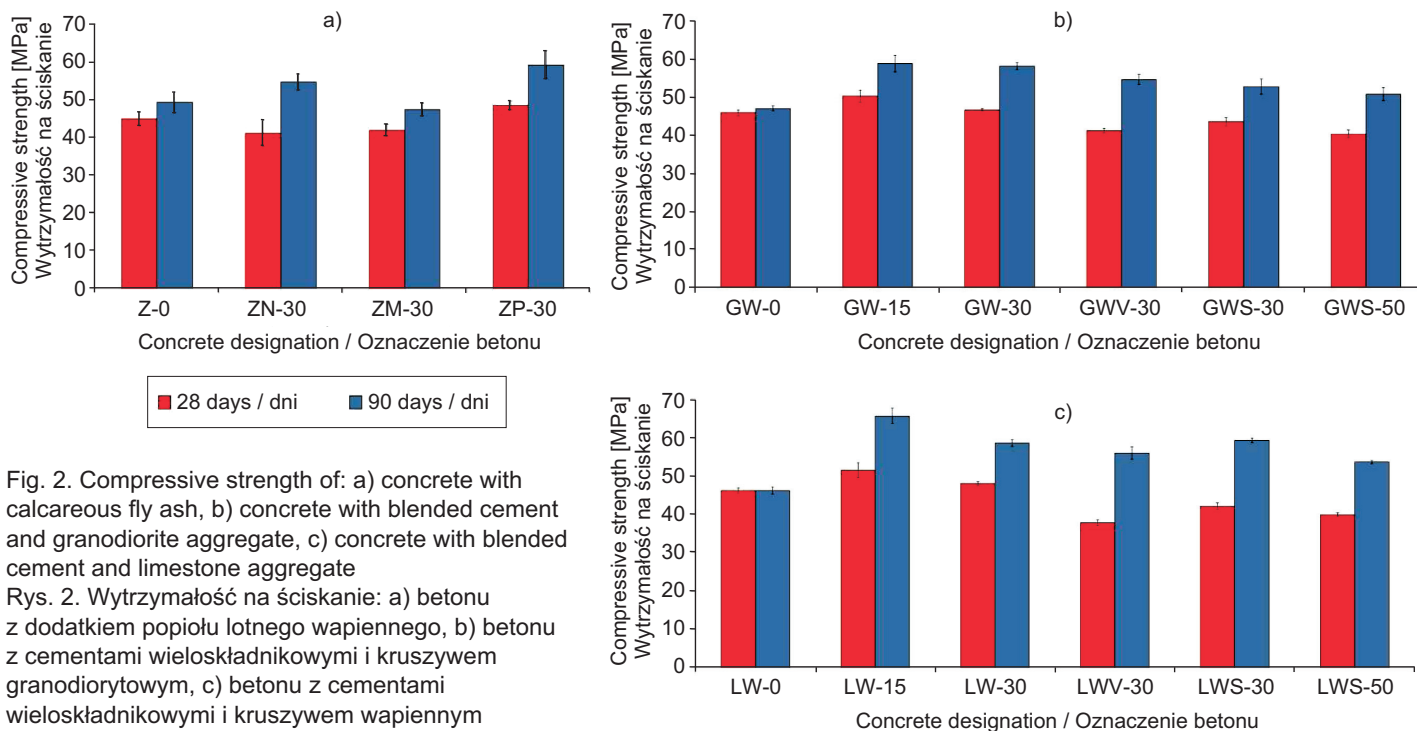


Fig. 2. Compressive strength of: a) concrete with calcareous fly ash, b) concrete with blended cement and granodiorite aggregate, c) concrete with blended cement and limestone aggregate

Rys. 2. Wytrzymałość na ściskanie: a) betonu z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego, b) betonu z cementami wieloskładnikowymi i kruszywem granodiorytowym, c) betonu z cementami wieloskładnikowymi i kruszywem wapiennym

Wyniki oznaczenia mrozoodporności wewnętrznej betonu zostały przedstawione na Rys. 3 (podano wartości średnie z badania 3 próbek oraz rozrzut wyników). Zaobserwowano niewielkie zmniejszenie dynamicznego modułu sprężystości betonów wskutek cyklicznego zamrażania i rozmrażania. Po 100 i 150 cyklach zaobserwowany spadek średniej wartości modułu zawierał się w granicach 2-5%, a zatem był porównywalny z rozrzutami wyników pomiarów. Dodatek popiołu lotnego wapiennego do mieszanki betonowej nie wpływał istotnie na wartość dynamicznego modułu sprężystości, aczkolwiek wartości niższe o około 5% uzyskano w przypadku betonu z popiołem nieprzetworzonym (odebrany bezpośrednio spod elektrofiltra w elektrowni). Zastosowanie cementów z popiołem lotnym W także nie miało istotnego wpływu na zmiany dynamicznego modułu sprężystości betonu. W przypadku betonu z cementem zawierającym 15% popiołu W i z kruszywem wapiennym dynamiczny moduł sprężystości wynosił 47,5 GPa i był około 15% wyższy od

Test results of internal damage due to freeze-thaw cycling are presented in Fig. 3, namely the average values obtained on three specimens and the range of variation. After freeze-thaw cycling a small decrease of the resonant elastic modulus of concrete was found. After 100 and 150 cycles the decrease in the average value of dynamic modulus of elasticity was in the range of 2% to 5%, this range being comparable to the variation in the measurement results. An addition of W-type fly ash had no significant effect on the elastic modulus tested with the impulse excitation of resonant vibration except that a decrease of ca. 5% was noted for concrete containing unprocessed fly ash. Also the use of blended cements containing W-type fly ash had a little effect on the value of dynamic modulus of elasticity. For limestone aggregate concrete with 15% content of W-type fly ash the modulus was 47.5 GPa and this value was by 15% higher than the value determined on specimens produced with other cement types, including CEM I. One can expect that the content of entrained air was also relevant in this respect.

wartości modułu w przypadku betonów z innymi cementami, w tym CEM I. Można oczekiwać, że na wielkość modułu sprężystości wpłynęła także zawartości porów powietrznych wprowadzonych w wyniku napowietrzania betonu.

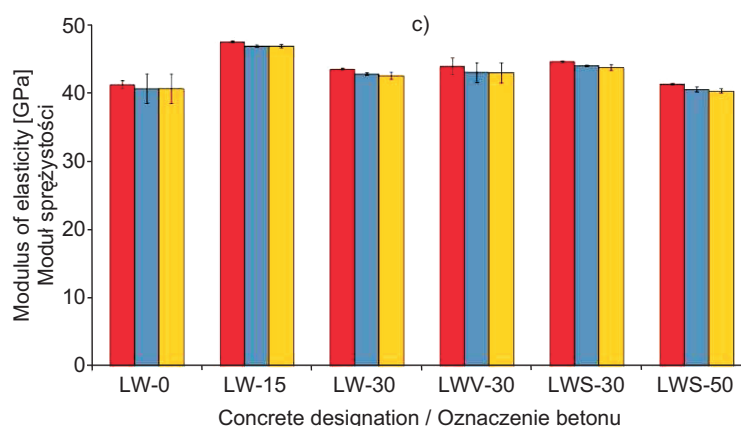
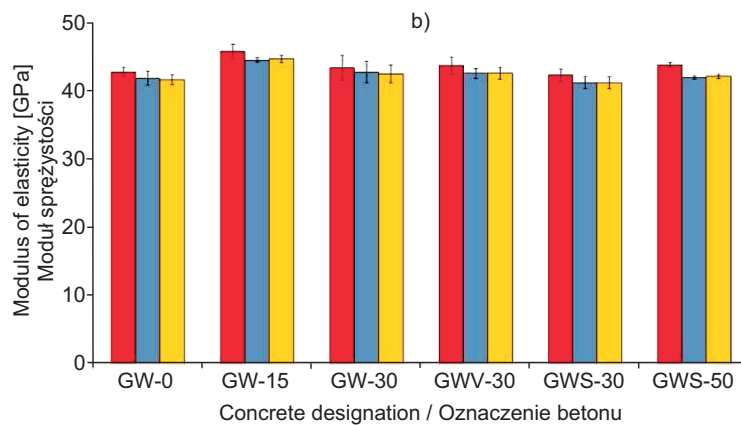
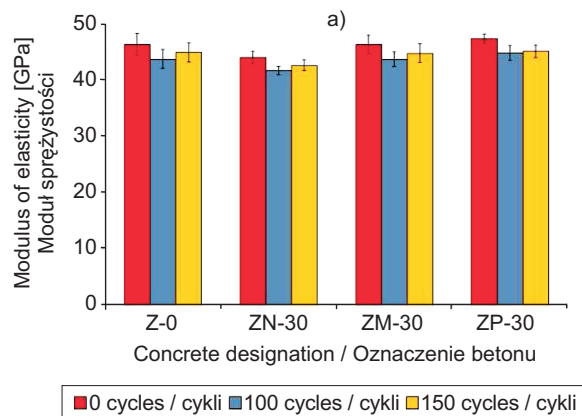


Fig. 3. Effects of cyclic freezing and thawing on the dynamic modulus of elasticity of: a) concrete with calcareous fly ash, b) concrete with blended cement and granodiorite aggregate, c) concrete with blended cement and limestone aggregate

Rys. 3. Wpływ cyklicznego zamrażania i rozmrażania na dynamiczny moduł sprężystości: a) betonu z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego, b) betonu z cementami wieloskładnikowymi i kruszywem granodiorytowym, c) betonu z cementami wieloskładnikowymi i kruszywem wapiennym

Na Rys. 4 przedstawiono wyniki badania odporności betonu na powierzchniowe łuszczenie wskutek cyklicznego zamrażania i rozmrażania w obecności 3% roztworu NaCl. Jako miarę odporności na takie oddziaływanie agresywne przyjmuje się na ogół masę złuszczonego materiału po 56 cyklach zamrażania-rozmrażania m_{56} . Stwierdzono bardzo dobrą odporność na powierzchniowe łuszczenie w obecności soli odladzających betonów z kruszywem granodiorytowym i z cementami wieloskładnikowymi ($m_{56} < 0,1 \text{ kg/m}^2$), zarówno w wieku 28 i 90 dni, niezależnie od rodzaju cementu (Rys. 4b). Bardzo dobrą odporność na powierzchniowe złuszczenie stwierdzono także w przypadku betonów z kruszywem wapiennym i cementami wieloskładnikowymi, z wyjątkiem betonów oznaczonych LW-15 i LWS-50, których odporność kwalifikuje się do klasy dobrej z uwagi na m_{56} nie większe niż $0,35 \text{ kg/m}^2$. W przypadku betonu LWS-50 podwyższona masa złuszczeń była związana z zaobserwowanym odspojeniem się ziaren kruszywa na eksponowanej powierzchni betonu. Nieco niższą odporność na powierzchniowe złuszczenie betonów serii L

Fig. 4 presents frost salt scaling resistance tested by freeze-thaw cycling of concrete in the presence of 3% NaCl solution. Such resistance is commonly defined by accumulated mass of scaled material after fifty six freeze-thaw cycles m_{56} . A very good resistance to frost salt scaling was found for specimens made of crushed granodiorite concrete including blended cements ($m_{56} < 0.1 \text{ kg/m}^2$) for all kinds of cement and both after 28 and 90 days of curing. A very good scaling resistance was noted also for crushed limestone concrete with blended cements, except for the mixes designated LW-15 and LWS-50 for which m_{56} did not exceed 0.35 kg/m^2 , which meant a good scaling resistance. A greater mass of scaled material, as determined for concrete designated LWS-50, was due to the observed detachment of aggregate grains from the exposed concrete surface. A slightly lower resistance to scaling of specimens made of L concrete, as compared to the G concrete, may be attributed to the reduced strength of cement paste layers at the interface with aggregate grains.

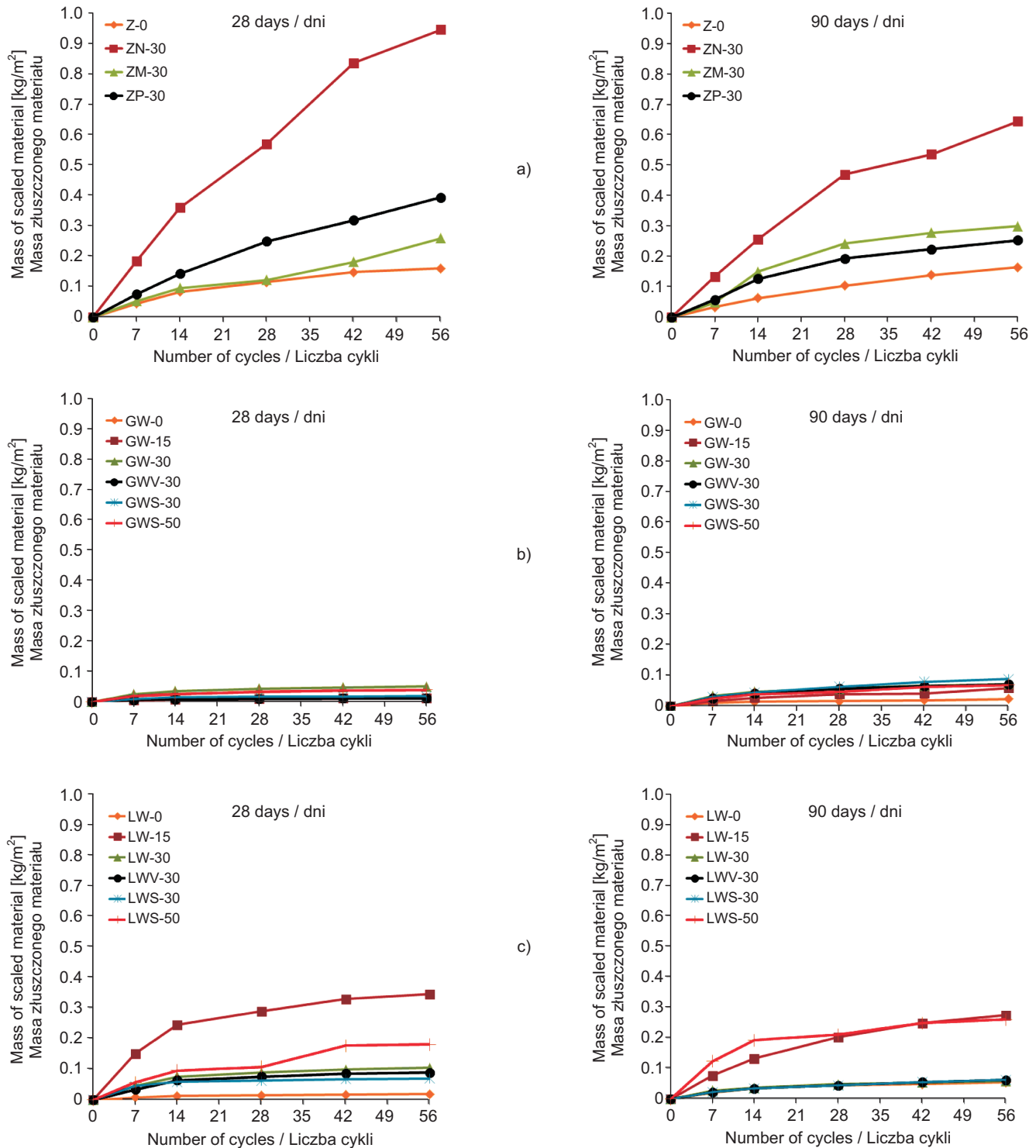


Fig. 4. Effects of cyclic freezing and thawing on the scaling resistance with 3% NaCl solution for: a) concrete with calcareous fly ash, b) concrete with blended cement and granodiorite aggregate, c) concrete with blended cement and limestone aggregate

Rys. 4. Wpływ cyklicznego zamrażania i rozmrażania na powierzchniowe łuszczenie w obecności 3% roztworu NaCl: a) betonu z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego, b) betonu z cementami wieloskładnikowymi i kruszywem granodiorytowym, c) betonu z cementami wieloskładnikowymi i kruszywem wapiennym

(kruszywo wapienne) w porównaniu z betonami serii G (kruszywo granodiorytowe) można więc przypisać obniżonej wytrzymałości warstw kontaktowych zaczynu z kruszywem.

Przy stosowaniu popiołu lotnego wapiennego jako dodatku do betonu masa złuszczeń m_{56} zawierała się w granicach 0,15-0,94 kg/m², co odpowiadało dobrej lub dostatecznej klasie odporności. Dodatek popiołu W powodował zwiększenie masy złuszczeń, ale odporność na złuszczenia powierzchniowe betonu z popiołem w formie mielonej lub przesianej była tylko nieco niższa od odporności betonu bez dodatków. Zmniejszenie odporności betonów z popiołem lotnym wapiennym widoczne po 28 dniach dojrzewania było wyraźnie skorelowane z obniżoną powierzchnią właściwą porów i zwiększonym wskaźnikiem rozmieszczenia porów. W wieku 90 dni różnice odporności betonów w tej serii korzystnie się zmniejszyły, pomimo wspomnianego zróżnicowania charakterystyki porów powietrznych. Największe złuszczenia powierzchniowe zanotowano w przypadku stosowania popiołu nieprzetworzonego, a zatem zawierającego porowate agregaty ziaren o zwiększonej zawartości niespalonego węgla.

Otrzymane wyniki wskazują, że zastosowanie popiołu lotnego wapiennego w betonach napowietrzonych, zarówno w postaci dodatku do mieszanki, jak też w formie składnika głównego cementów wieloskładnikowych, powoduje pewne podwyższenie wytrzymałości na ściskanie, co na ogół kojarzy się z podwyższeniem zwartości mikrostruktury. Jednakże o odporności betonów na powierzchniowe złuszczenie decydują głównie charakterystyka porów powietrznych, zwłaszcza α i \bar{L} , a zaobserwowany negatywny wpływ popiołu lotnego W przede wszystkim ujawnia się poprzez niestabilność napowietrzenia. Ubytek powietrza z mieszanki dotyczy porów powietrznych o dużych średnicach, które mniej efektywnie wpływają na poprawę mrozoodporności betonu niż pory mniejsze. Są to stwierdzenia nowe w stosunku do opublikowanych w pracach [9 - 10].

W zakresie omawianych badań pominięto istotne zagadnienie zróżnicowania dojrzałości betonów z dodatkami w przypadku zróżnicowania warunków pielęgnacji. Brak odpowiednio długiej pielęgnacji wilgotnej, niezbędnej w przypadku cementów wieloskładnikowych lub dodatków popiołowych do mieszanki, może spowodować niekorzystne zmiany w warstwie powierzchniowej betonu (podwyższenie porowatości, mikrospekkania), wpływające na obniżenie trwałości [14]. Jak wykazano w [15], w przypadku betonów napowietrzonych z cementami wieloskładnikowymi zawierającymi popiół lotny wapienny

The mass of scaled material m_{56} was in the range of 0.15 to 0.94 kg/m² for concrete specimens made using calcareous fly ash as concrete addition and that meant good or sufficient scaling resistance. An addition of W-type fly ash increased mass of scaled material; the frost salt scaling resistance of concrete containing either ground or sieved ash was only slightly lower than that of reference concrete. A decrease of scaling resistance of concrete containing W-type fly ash tested after 28 days of curing was clearly correlated to the reduction in the specific surface of air voids and a higher value of the spacing factor. At the age of 90 days a desired reduction of the difference in the scaling resistance was noted, despite the above-mentioned variation in the air void system characteristics. The greatest frost salt scaling was measured on specimens produced with unprocessed fly ash, containing also porous agglomerations of aggregate grains containing more unburnt coal.

The test results show that calcareous fly ash used in air-entrained concrete, either as an addition or as a main constituent of blended cement, results in some increase of compressive strength, which is generally attributed to a more dense microstructure. However, the scaling resistance of concrete depends mainly on the parameters of the air-void system, the most important of which are the specific surface α and the spacing factor \bar{L} , and the main demonstration of the observed adverse effect of W-type fly ash is the instability of entrained air system. Escaping of air bubbles from the mix concerns primarily larger voids, which are not as effective in improving the frost resistance as the smaller ones. These conclusions are new as compared to the earlier conclusions of [9 - 10].

The scope of the described research ignored a significant issue of differentiating the age of concrete containing admixtures depending on the curing conditions. Insufficient time of wet curing, indispensable for mixtures containing blended cements or mineral additions, may bring undesired changes in the surface layer (increased porosity, microcracking), which affect the durability of concrete [14]. According to [15] frost salt scaling of air-entrained concrete produced with blended cement containing calcareous fly ash expressed by m_{56} was even ten times higher on specimens cured in air, as compared to the specimens cured in water. Therefore, for air-entrained concrete containing W-type fly ash an effective wet curing is a pre-requisite, but does not by itself guarantee obtaining high resistance to the combined aggressive action of frost and de-icing salt.

dojrzewanie w powietrzu odbiło się znaczącym wzrostem masy złuszczeń m_{56} , nawet 10-krotnym, w stosunku do próbek dojrzewających w wodzie. Właściwą pielęgnację wilgotną betonów napowietrzonych zawierających popiół lotny wapienny należy więc traktować jako warunek konieczny, choć niewystarczający, do uzyskania wysokiej odporności na agresję mrozu w obecności soli odładzających.

4. WNIOSKI

Przeprowadzone badania pozwalają na sformułowanie wniosków:

- Zastosowanie popiołu lotnego wapiennego jako dodatku do betonu lub jako składnika głównego cementu spowodowało konieczność od 3 do 18-krotnego zwiększenia zawartości domieszki napowietrzającej, niezbędnej do uzyskania projektowanej zawartości powietrza w mieszance betonowej.
- Przy właściwej charakterystyce porów powietrznych w betonie odporność na powierzchniowe złuszczenie betonu z cementami, zawierającymi jako składnik główny popiół lotny W, i z kruszywem granodiorytowym mieściła się w klasie odporności bardzo dobrej – masa złuszczeń wynosiła poniżej $0,1 \text{ kg/m}^2$ po 28 i 90 dniach dojrzewania.
- Zastosowanie popiołu lotnego wapiennego w postaci nieprzetworzonej jako dodatku do betonu spowodowało sześciokrotne zwiększenie masy złuszczonego materiału względem betonu odniesienia na cemencie portlandzkim CEM I, natomiast w przypadku popiołów lotnych wapiennych zmieszanych wzrost masy złuszczonego materiału wyniósł jedynie 60%.
- Zmniejszenie dynamicznego modułu sprężystości po 150 cyklach zamrażania i rozmrażania betonów wyniosło 2-5%, tj. w granicach rozrzutu wyników, w odniesieniu do betonu przed cyklicznym zamrażaniem. Wewnętrzna mrozoodporność betonu nie zależała od zawartości popiołu lotnego wapiennego.
- Zastosowanie cementów zawierających jako składnik główny popiół lotny W spowodowało zwiększenie wytrzymałości na ściskanie betonów dojrzewających 90 dni od 8% do 30% w odniesieniu do betonu z cementu portlandzkiego CEM I. Wpływ popiołu wapiennego jako dodatku do betonu miał pozytywny wpływ na wytrzymałość na ściskanie; najbardziej efektywny był dodatek popiołu przesianego, którego zastosowanie wywołało wzrost wytrzymałości o około 20% w wieku 90 dni w stosunku do wytrzymałości betonu bez dodatków.

4. CONCLUSIONS

On the basis of the above described results of testing the following conclusions can be drawn:

- An increased content of air-entraining agent by 3 to 18 times was needed in order to obtain the specified total content of air in concrete mixes containing calcareous fly ash as a concrete addition or main constituent of blended cements.
- Provided that an appropriate entrained air-void system was formed the frost salt scaling resistance of concrete, containing crushed granodiorite and blended cements with calcareous fly ash, was rated to be very good on the basis of the obtained mass of scaled material below 0.1 kg/m^2 , determined after 28 and 90 days of curing.
- The use of unprocessed or ground calcareous fly ash as concrete additive resulted in increased scaling as compared to the reference concrete by six times or only by 60%, respectively.
- A reduction of dynamic modulus of elasticity after 150 freeze-thaw cycles was found to be in the range of 2% to 5% (comparable to scatter of results), compared against concrete prior to freeze-thaw cycling. The resistance of air-entrained concrete to internal frost damage did not depend on the content of calcareous fly ash.
- The use of blended cements containing W-type fly ash increased the 90-day compressive strength by 8% to 30%, as compared to concrete containing cement CEM I. Calcareous fly ash used as addition to concrete mix positively affected the compressive strength of concrete; the most effective was sieved fly ash, which induced an increase of the 90-day compressive strength by ca. 20% in relation to reference concrete.

ACKNOWLEDGEMENT

The research is a part of the research project “Innovative cement based materials and concrete with high calcium fly ashes” co-financed by the European Union from the European Regional Development Fund.

INFORMACJE DODATKOWE

Praca była współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, nr projektu: POIG.01.01.02-24-005/09.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Eck T.*: Wykorzystanie popiołu z węgla do betonu – doświadczenia w Niemczech. EUROCOALASH, Warszawa, 2008, 99 - 113
- [2] *Rusin Z.*: Technologia betonów mrozoodpornych. Polski Cement, Kraków, 2002
- [3] *Dziuk D., Giergiczny Z., Garbacik A.*: Calcareous fly ash as a main constituent of common cements. Roads and Bridges – Drogi i Mosty, **12**, 1, 2013, 57 - 69
- [4] *Giergiczny Z., Synowiec K., Żak A.*: Suitability evaluation of calcareous fly ash as an active mineral additive to concrete. Roads and Bridges – Drogi i Mosty, **12**, 1, 2013, 83 - 97
- [5] *Yazici H.*: The effect of silica fume and high-volume class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete. Construction and Building Materials, **22**, 2008, 456 - 462
- [6] *Pigeon M., Talbot C., Marchand J., Hornain H.*: Surface microstructure and scaling resistance of concrete. Cement and Concrete Research, **26**, 10, 1996, 1555 - 1566
- [7] *Glinicki M.A.*: Durability of concrete in road pavements: influence of microstructure, material design and diagnostics. IBDiM, Warszawa, 2011 (in Polish)
- [8] *Pedersen K.H., Jensen A.D., Skjærth-Rasmussen M.S., Dam-Johansen K.*: A review of the interference of carbon containing fly ash with air entrainment in concrete. Progress in Energy and Combustion Science, **34**, 2008, 135 - 154
- [9] *Glinicki M.A., Zieliński M.*: Air void system in concrete containing circulating fluidized bed combustion fly ash. Materials and Structures, **41**, 4, 2008, 681 - 687
- [10] *Glinicki M.A., Zieliński M.*: Frost salt scaling resistance of concrete containing CFBC fly ash. Materials and Structures, **42**, 7, 2009, 993 - 1002
- [11] *Glinicki M.A., Dąbrowski M.*: Influence of high calcium fly ash on air entrainment and air void characteristics of concrete. Międzynarodowa Konferencja Popioły z Energetyki, Warszawa, 2010, 77 - 92 (in Polish)
- [12] *Baran T., Drożdż W.*: Evaluation of properties of domestic calcareous fly ash and its processing methods. Roads and Bridges – Drogi i Mosty, **12**, 1, 2013, 5 - 15

- [13] *Malhotra V.M., Ramenzianpour A.A.*: Fly ash in concrete. CANMET, Ottawa 1994
- [14] *Ramenzianpour A.A., Malhorta V.M.*: Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume. Cement and Concrete Composites, **17**, 1995, 125 - 133
- [15] *Dąbrowski M., Gibas K., Nowowiejski G., Glinicki M.A.*: Influence of curing conditions on durability of air entrained concrete made of blended cements containing calcareous fly ash. Konferencja Dni Betonu „Tradycja i nowoczesność”, SPC, Kraków, 2012, 483 - 492 (in Polish)

STANDARDS / NORMY

- ASTM C 215-08: Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens
- CEN/TR 15177:2006 Testing the freeze-thaw resistance of concrete. Internal structural damage
- PKN-CEN/TS 12390-9:2007 Testing hardened concrete. Part 9: Freeze-thaw resistance – scaling
- PN-EN 197-1:2012 Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
- PN-EN 206-1:2003 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- PN-EN 480-11:2008 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – metody badań. Część 11: Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie
- PN-EN 12350-2:2011 Badania mieszanki betonowej. Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka
- PN-EN 12350-6:2011 Badania mieszanki betonowej. Część 6: Gęstość
- PN-EN 12350-7:2011 Badania mieszanki betonowej. Część 7: Badanie zawartości powietrza – metody ciśnieniowe
- PN-EN 12390-3:2011 Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania

