



GRZEGORZ KNOR¹⁾
 MICHAŁ A. GLINICKI²⁾
 JAN HOLNICKI-SZULC³⁾
 ANDRZEJ OSSOWSKI⁴⁾
 ZBIGNIEW RANACHOWSKI⁵⁾

INFLUENCE OF CALCAREOUS FLY ASH ON THE TEMPERATURE OF CONCRETE IN MASSIVE ELEMENTS DURING THE FIRST 72 HOURS OF HARDENING

WPŁYW POPIOŁÓW LOTNYCH WAPIENNYCH NA TEMPERATURĘ BETONU W CZASIE PIERWSZYCH 72 GODZIN TWARDNIENIA W ELEMENTACH MASYWNYCH

STRESZCZENIE. W celu uniknięcia powstawania spękań wywołanych termicznie w masywnych elementach konstrukcji betonowych, często stosuje się dodatki mineralne częściowo zastępujące cement w mieszance betonowej. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów temperatury twardnienia betonów z dodatkiem popiołów lotnych wapiennych z Elektrowni Bełchatów. Zakres badań objął 76 mieszanek betonowych z trzema rodzajami kruszywa i zróżnicowaną zawartością spoiwa. Badania doświadczalne przeprowadzono stosując oryginalną metodę wyznaczania parametrów termicznych twardniejących betonów w jednowymiarowych formach umożliwiających swobodny przepływ ciepła w jednym kierunku. Na podstawie uzyskanych wyników oszacowano wpływ składników mieszanek betonowych, przede wszystkim popiołu lotnego wapiennego, na tempo wzrostu temperatury betonu podczas twardnienia, czas wystąpienia temperatury maksymalnej oraz na gradienty temperatury. Zaproponowano wzór do oceny kaloryczności mieszanek betonowych w zależności od ich składu.

SŁOWA KLUCZOWE: beton masywny, cement wieloskładnikowy, ciepło twardnienia, gradient temperatury, popiół lotny wapienny, temperatura twardnienia.

ABSTRACT. As a measure to avoid thermally induced cracking in massive concrete, mineral admixtures are often added as a substitute for a certain portion of cement. This paper presents the results of testing in course of which the temperature was measured during hardening of concrete mixtures produced with addition of calcareous fly ash obtained from the Power Station in Bełchatów, Poland. The investigation covered 76 concrete mixtures produced with three different aggregates and diverse binder content. In the experimental part of the research, the thermal parameters of hardening concrete were determined with a specially developed method in which the mixture was placed in a one-dimensional mould which allowed for unrestrained flow of heat in one direction. The results of testing were used to assess the influence of the respective ingredients, in particular calcareous fly ash, on the rate of rise of the fresh concrete temperature, on the time of occurrence of the maximum temperature and on the temperature gradients. Finally, a formula for calculating the specific heat of hydration depending on the mixture composition was proposed.

KEYWORDS: high calcium fly ash, fresh concrete temperature, heat of hydration, massive concrete, multicomponent cement, temperature gradient.

¹⁾ Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa; gknor@ippt.pan.pl (✉)

²⁾ Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa; mglinic@ippt.pan.pl

³⁾ Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa; holnicki@ippt.pan.pl

⁴⁾ Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa; aossow@ippt.pan.pl

⁵⁾ Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa; zranach@ippt.pan.pl

1. WPROWADZENIE

Ryzyko powstawania spękań w konstrukcjach masywnych, zwłaszcza w początkowym okresie dojrzewania betonu, pojawia się wskutek zmian objętościowych betonu wywołanych zmianami temperatury [1], [2]. Dlatego do wykonania takich konstrukcji dobierane są cementy o odpowiednio małym cieple hydratacji. Jak wykazali autorzy pracy [3], pomiary z zastosowaniem kalorymetru semia-diabatycznego, przeprowadzone zgodnie z PN-EN 196-9, wykazują znaczące zmniejszenie ciepła hydratacji przy wzrastającej zawartości pozaklinkierowych składników głównych w cemencie. Jednak normowe badania ciepła hydratacji, przeprowadzane na zaprawach cementowych i umożliwiające wyodrębnienie cementów specjalnych LH i VLH, tylko w ograniczonym stopniu pozwalają na oszacowanie zjawiska samoocieplenia betonu w konstrukcji. Dlatego podjęto badania nad opracowaniem nowej procedury pomiaru oraz sprzężonego systemu modelowania [4] parametrów termicznych twardniejących betonów kruszywowych, a nie tylko zapraw, przede wszystkim w celu oszacowania efektów stosowania popiołu lotnego wapiennego (W) jako dodatku do mieszanki betonowej lub jako składnika głównego cementów wieloskładnikowych.

Wykorzystanie popiołów lotnych, zwłaszcza popiołów lotnych krzemionkowych, jest znanym sposobem obniżenia temperatury twardniejących masywnych elementów betonowych [5]. Znane są pozytywne efekty zastosowania greckich popiołów W w mieszankach betonowych przeznaczonych do budowy masywnych zapór betonowych [6], polegające przede wszystkim na obniżeniu temperatury twardniejących betonów. Tylko nieliczne publikacje obejmujące popioły W dotyczą właściwości termicznych betonów. Autorzy pracy [7] określili ciepło właściwe, przewodnictwo cieplne i dyfuzyjność cieplną betonów z popiołami krzemionkowymi i wapiennymi. Ponadto w pracy [8] stwierdzono, że w betonach o dużej zawartości popiołu lotnego występuje opóźnienie zachodzących reakcji w początkowym etapie twardnienia oraz zmniejszenie ich intensywności. Z powodu znacznego zróżnicowania składu chemicznego i właściwości fizycznych popiołów lotnych wapiennych, spostrzeżeń tych nie można jednak uogólnić. Dlatego podjęto badania wpływu popiołu lotnego wapiennego na właściwości termiczne betonów w ciągu pierwszych 72 godzin twardnienia. W odróżnieniu od pracy [4], przedstawiającej numeryczną metodę wyznaczania termicznych właściwości betonów na podstawie punktowych pomiarów temperatury, niniejszy artykuł

1. INTRODUCTION

The risk of cracking in massive concrete elements, especially in the initial hardening phase, is a result of changes in the volume of concrete caused by temperature variations [1], [2]. For this reason, low-heat cements are chosen for such applications. As it has been proven by the authors of [3], in the research based on the semiadiabatic calorimetry method according to EN 196-9, the heat of hydration significantly drops with the increase of supplementary cementitious materials content. However, the standard test methods used to measure the heat of hydration of cement mortars and to classify LH and VLH special cements are not as effective in quantifying the amount of heat generated in hardening concrete. Therefore, efforts have been undertaken to develop a new measurement procedure and a coupled system [4] for modelling the thermal parameters during the hardening of concretes, not only mortars and, more importantly, to evaluate the effects of calcareous fly ash used as an additive to concrete mixtures or as a main constituent of multicomponent cements.

Addition of fly ashes, including siliceous fly ashes in particular, is a common method of lowering the temperature of fresh concrete in massive concrete elements [5]. Positive effects of Greek calcareous fly ash on concrete mixtures used in construction of gravity dams [6] have already been confirmed. The most important of them is a reduction of fresh concrete temperature. However, there are few publications concerning thermal properties of concrete among the publications on calcareous fly ash. The authors of [7] determined the specific heat, thermal conductivity and diffusivity of concrete mixtures produced with an addition of siliceous and calcareous fly ashes. Moreover, according to [8], calcareous fly ash added at a high quantity delays the start and reduces the intensity of reactions occurring in the initial hardening time. However, these observations cannot be generalised due to strong local variations in the chemical composition and in the physical properties of calcareous fly ash. For this reason the research on the influence of calcareous fly ash on thermal properties of concrete during the first 72 hours of hardening was undertaken. Unlike in [4] where the thermal properties of concrete were determined numerically on the basis of point temperature measurements, this paper presents experimental assessment of the specific heat of hydration of concrete mixtures produced with an addition of calcareous fly ash in both laboratory and field conditions.

dotyczy doświadczalnej oceny kaloryczności mieszanek betonowych, modyfikowanych dodatkiem popiołu lotnego wapiennego, prowadzonej zarówno w skali laboratoryjnej, jak i w warunkach polowych.

2. OPIS BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

2.1. MATERIAŁY DO BADAŃ

Badania doświadczalne przeprowadzono w przypadku 76 mieszanek betonowych, w których część (odpowiednio 0%, 15%, 30%, 60% i 100%) cementu portlandzkiego została zastąpiona przez popiół lotny W. Zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5 R oraz popiół lotny wapienny, pobrany z Elektrowni Bełchatów w sześciu dużych partiach w latach 2010 - 2011. Analiza porównawcza składu chemicznego popiołów lotnych wapiennych z różnych krajowych elektrowni wykazała największą potencjalną przydatność popiołów z Bełchatowa. Skład chemiczny i właściwości fizyczne popiołów zostały przedstawione w pracy [9]. Zaprojektowane mieszanki betonowe miały intencjonalnie zmienną zawartość oraz rodzaj kruszywa grubego o uziarnieniu od 2 mm do 16 mm.

2. EXPERIMENTAL TESTS

2.1. MATERIALS USED IN THE RESEARCH

The tests were carried out on a total number of 76 concrete mixtures in which a part of Portland cement was substituted with calcareous fly ash (0%, 15%, 30%, 60% and 100%, respectively). The main constituents included Portland cement class CEM I 42.5 R and calcareous fly ash obtained from Power Station Bełchatów in six large batches in the period of 2010 - 2011. Calcareous fly ashes from several local power stations were tested and the material generated in the power station Bełchatów appeared to be the most suitable. The chemical composition and physical properties of fly ashes are presented in [9]. The mixtures were composed with varying content and different types of coarse aggregate of 2-16 mm particle size (grading). Three types of coarse aggregate were used: crushed amphibolite, crushed limestone and crushed granodiorite. The composition of mixtures of one series of specimens, produced with the addition of calcareous fly ash and granodiorite crushed aggregate, are given in Table 1.

Table 1. The composition of concrete mixtures made with calcareous fly ash and granodiorite crushed aggregate
Tablica 1. Skład mieszanek betonowych wykonanych z dodatkiem popiołu W oraz grysem granodiorytowym

Constituents of the concrete mixture Składniki mieszanki betonowej	Content [kg/m ³] of the respective mixtures as follows: Zawartość składników [kg/m ³] w mieszance o oznaczeniu:					
	P50 0	P50 30 Ws	P50 60 Ws	P50 30 Wm	P50 60 Wm	PP50 0
Cement class CEM I 42.5R from/z Górażdże	400	280	160	280	160	800
Calcareous fly ash – Power Station Bełchatów Popiół lotny wapienny – Elektrownia Bełchatów	0	120 ^{*)}	240 ^{*)}	120 ^{**)}	240 ^{**)}	0
Sand, 0-2 mm size fraction Piasek o uziarnieniu 0-2 mm	580	564	547	564	547	290
Granodiorite crushed aggregate, 2-8 mm size fraction Grys granodiorytowy o uziarnieniu 2-8 mm	625	625	625	625	625	305
Granodiorite crushed aggregate, 8-16 mm size fraction Grys granodiorytowy o uziarnieniu 8-16 mm	615	615	615	615	615	295
Water Woda	200	200	200	200	200	400
Glenium SKY 59 superplasticizer Domieszka upłynniająca Glenium SKY 59	0	1.4	6	0	1.1	0

Remarks / Uwagi

^{*)} unprocessed fly ash III: 2.64 g/cm³ density, Blaine fineness of 1900 cm²/g (designated Ws)
popiół III nieuzdatniony: gęstość 2,64 g/cm³, powierzchnia właściwa według Blaine'a 1900 cm²/g (oznaczona Ws)

^{**)} ground fly ash III: 2.71 g/cm³ density, Blaine fineness of 4060 cm²/g (designated Wm)
popiół III przemielony: gęstość 2,71 g/cm³, powierzchnia właściwa według Blaine'a 4060 cm²/g (oznaczona Wm)

Zastosowano trzy rodzaje kruszywa grubego: grys amfibolitowy, grys wapienny oraz grys granodiorytowy. Skład mieszanek betonowych w jednej z badanych serii, wykonanych z dodatkiem popiołu W oraz grysem granodiorytowym, podano w Tablicy 1. Analogicznie zaprojektowano mieszanki z innymi rodzajami kruszywa, zakładając w obrębie serii stały wskaźnik wodno-spoiwowy w zakresie od 0,5 do 0,6, ewentualnie korygując konsystencję domieszką upłynniającą. Mieszanki wykonano w mieszarce laboratoryjnej.

W przypadku 12 mieszanek stosowano różne cementy wieloskładnikowe [10], zawierające popiół W jako pozaklinkierowy składnik główny (Tabl. 2). Wykorzystując takie cementy, zaprojektowano serie mieszanek betonowych o jednakowej zawartości cementu, wody oraz o zbliżonej zawartości piasku 0-2 mm oraz odpowiednich frakcji kruszywa (2-8 mm i 8-16 mm). W Tablicy 3 podano skład mieszanek betonowych z kruszywem grubym w postaci grysu granodiorytowego, natomiast mieszanki zawierające grys wapienny miały podobne proporcje składników [11].

Mixtures containing other types of aggregate were composed in a similar way, with the same *w/c* ratio in the range of 0.5 - 0.6 and superplasticiser added if required to obtain the desired workability (consistency). The mixtures were produced in a laboratory concrete mixer.

Calcareous fly ash was used as a supplementary cementitious material – SCM (Table 2) in 12 multicomponent cements [10]. These cements were used to compose a series of concrete mixtures with the same content of cement and water and similar content of 0-2 mm sand and other fractions of aggregate (2-8 mm and 8-16 mm). The concrete mixtures including coarse granodiorite aggregate had varying composition, as presented in Table 3, while the mixtures containing limestone aggregate were produced according to a similar composition [11].

On industrial scale the mixtures were produced in concrete mixers of 1 m³ capacity according to the laboratory mix composition, subsequently they were transported in concrete truck and poured into insulated rectangular moulds.

Table 2. The content of supplementary cementitious materials in new types of cement CEM II and CEM V^{*)}
 Tablica 2. Zawartość pozaklinkierowych składników głównych w nowych rodzajach cementu CEM II i CEM V^{*)}

Supplementary cementitious materials (SCM) Główne pozaklinkierowe składniki cementu	Content Zawartość [%]					
	CEM I	CEM II/B-W	CEM II/B-M (S-W)	“CEM V/A (S-W)”	CEM II/A-W	CEM II/B-M (V-W)
Calcareous fly ash (W) Popiół lotny wapienny W	0	28.9	14.3	23.9	14.3	14.3
Siliceous fly ash (V) Popiół lotny krzemionkowy V	0	0	0	0	0	14.3
Ground granulated blast furnace slag (S) Mielony granulowany żużel wielkopiecowy S	0	0	14.3	23.9	0	0
Remark / Uwaga *) not included in PN-EN 197-1 / nie uwzględniony w PN-EN 197-1						

W skali przemysłowej mieszanki betonowe wykonano w mieszarce o pojemności 1 m³ według receptur laboratoryjnych, przetransportowano betonowozem i wbudowano w izolowane formy prostopadłościenne.

2.2. METODY BADAŃ

Określenie rozkładu temperatury w twardniejących elementach betonowych przeprowadzono na zbudowanym stanowisku badawczym, składającym się z cylindrycznej komory pomiarowej, izolowanej termicznie od otoczenia

2.2. TESTING PROCEDURES

The distribution of temperature in hardening concrete was determined in a special test stand consisting of a cylindrical measuring chamber insulated from the surrounding environment with two layers of closed cell polyethylene foam (Fig. 1). The measuring chamber had 96 mm inside diameter and 500 mm height. For measuring temperature in hardening concrete spot temperature sensors were deployed along the axis of symmetry of the cylinder at the height of 50 mm, 200 mm, 350 mm and 500 mm above

Table 3. The composition of concrete including granodiorite aggregate and multicomponent cements
 Tablica 3. Skład betonu z kruszywem granodiorytowym i cementami wieloskładnikowymi

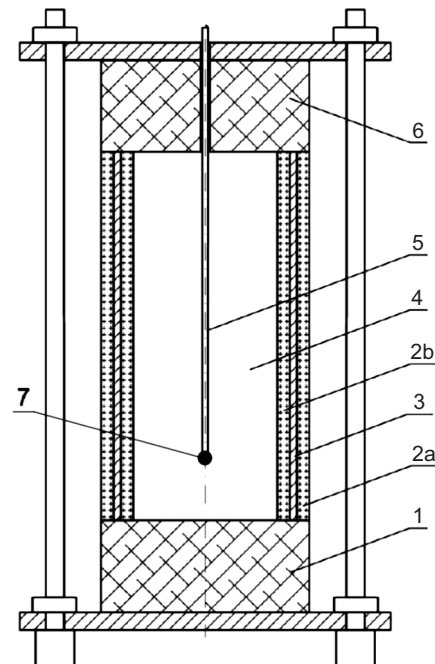
Constituents of concrete mixture Składniki mieszanki betonowej		Content [kg/m ³] in the following mixtures: Zawartość składników w [kg/m ³] w mieszance o oznaczeniu:					
		T50_I	T50_IIB(W)	T50_IIB(S-W)	T50_VA(S-W)	T50_IIA(W)	T50_IIB(V-W)
Cement	Content Zawartość	400	400	400	400	400	400
	Type Rodzaj	CEM I	CEM II/B-W	CEM II/B-M (S-W)	“CEM V/A (S-W)”	CEM II/A-W	CEM II/B-M (V-W)
Sand, 0-2 mm fraction Piasek o uziarnieniu 0-2 mm		580	580	580	580	580	580
Granodiorite crushed aggregate, 2-8 mm fraction Grys granodiorytowy o uziarnieniu 2-8 mm		625	625	625	625	625	625
Granodiorite crushed aggregate, 8-16 mm fraction Grys granodiorytowy o uziarnieniu 8-16 mm		615	615	615	615	615	615
Water Woda		200	200	200	200	200	200

za pomocą dwóch warstw pianki polietylenowej o zamkniętych porach (Rys. 1). Średnica wewnętrzna komory pomiarowej wynosiła 96 mm, zaś wysokość 500 mm. Pomiary temperatury w próbkach twardniejącego betonu wykonano za pomocą punktowych mierników temperatury, rozmieszczonych wzdłuż osi symetrii walca w odległościach 50, 200, 350 i 500 mm od spodu próbki. Dodatkowo monitorowano temperaturę otoczenia nad próbką. Do pomiaru temperatury zastosowano czujniki typu LM35, współpracujące z jednostką rejestratora, zaprojektowaną w oparciu o mikrokontroler AT91SAM7S256-EK z interfejsem USB umożliwiającym transmisję danych do komputera. Dane zawierające odczyty temperatury były zapisywane w jednonominutowych odstępach czasu z rozdzielczością do 0,1°C.

the specimen bottom. The temperature of ambient air above the specimen was monitored as an additional parameter. The temperature was measured with LM 35 sensors connected to the recording unit based on AT91SAM7S256-EK microcontroller with USB interface for sending the data to PC. The temperature readouts were recorded at one minute intervals with 0.1°C resolution.

Fig. 1. Cylindrical measurement mold: 1 - bottom expanded polystyrene disc, 2a and 2b - polyethylene foam with closed pores, 3 - PVC pipe, 4 - measuring chamber, 5 - tube with temperature sensors, 6 - optional top expanded polystyrene disc, 7 - temperature sensor placed at the distance of 50 mm from the bottom

Rys. 1. Walcowa forma pomiarowa: 1 - krążek styropianowy dolny, 2a i 2b - pianka polietylenowa o zamkniętych porach, 3 - rura PVC, 4 - komora pomiarowa, 5 - rurka z czujnikami temperatury, 6 - opcjonalny krążek styropianowy górny, 7 - czujnik temperatury w odległości 50 mm od spodu formy



Do interpretacji uzyskanych rozkładów temperatury użyto trzech parametrów: maksymalny przyrost temperatury zarejestrowany podczas 72 godzin od zarobienia mieszanki (zdefiniowany jako różnica pomiędzy początkową temperaturą mieszanki a maksymalną osiągniętą temperaturą), czas wystąpienia maksymalnej temperatury oraz ciepło twardnienia obliczone według następującego wzoru empirycznego:

$$q_t = \sum_{n=0}^{4320} c_p \Delta t_n + V \frac{60 \cdot (51,5898 + 0,2394 \theta_n) \theta_n}{1000m}, \quad (1)$$

gdzie:

- q_t – ciepło twardnienia na kilogram betonu,
- c_p – przyjęta dla betonu z literatury wartość ciepła właściwego wynosząca 1,13 kJ/kgK,
- Δt_n – kolejne przyrosty temperatury próbki mierzone w minutowych odstępach czasu, w których temperatura wzrasta (przy ujemnych przyrostach temperatury wartość Δt_n wynosi 0),
- V – objętość używanej formy pomiarowej wynosząca 3500 cm³,
- θ_n – kolejne różnice temperatury próbki i temperatury otoczenia,
- m – masa próbki wyrażona w kilogramach.

Występujące we wzorze (1) współczynniki liczbowe określające własności termiczne formy zostały wyznaczone na podstawie pomiarów temperatury stygnącego w niej piasku.

Polowe określenie rozkładu temperatury w twardniejących elementach betonowych przeprowadzono w blokach prostopadłościennych o wymiarach 0,9 × 0,7 × 0,8 m, izolowanych termicznie na ściankach i od spodu. Przed zabetonowaniem, wewnątrz każdego z bloków umieszczono siedem rezystancyjnych mierników PT-100, a jeden miernik umieszczono nad blokiem do pomiaru temperatury otoczenia. Odczyty temperatury co 15 minut były rejestrowane przez 5 dób w pamięci rejestratora Impact XT8.

3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Wyniki rejestracji temperatury przykładowych mieszanek betonowych o składzie według Tablicy 1 pokazano na Rys. 2 i 3.

The following three parameters were used for evaluation of the obtained temperature distributions: the maximum increase of temperature during the first 72 hours from batching the mixture (defined as the difference between the initial and the maximum temperature), the time of its occurrence and the heat of hydration calculated with the following empirical formula:

$$q_t = \sum_{n=0}^{4320} c_p \Delta t_n + V \frac{60 \cdot (51,5898 + 0,2394 \theta_n) \theta_n}{1000m}, \quad (1)$$

where:

- q_t – the heat of hydration per kilogram of concrete,
- c_p – the specific heat of concrete taken at 1.13 kJ/kgK in accordance with the literature,
- Δt_n – the difference in temperature of the specimen measured at one minute intervals (for differences below zero Δt_n the value of 0 is assumed)
- V – the volume of the test mould, here: 3500 cm³,
- θ_n – the temperature differences between the specimen and the surroundings,
- m – the specimen weight in kilograms.

The numerical coefficients appearing in equation (1) which define the thermal properties of the mould were determined through measuring the temperature during cooling of hot sand placed in it.

The temperature distribution under field conditions was checked on 0.9 × 0.7 × 0.8 m rectangular blocks with insulated sides and bottom. Prior to pouring the mixture, seven resistance temperature detectors (RTD) model PT-100 were deployed inside the mould to measure the temperature inside the block and one RTD was placed above the block to monitor the ambient temperature. The temperature was measured at 15 minute intervals for five days and the readouts were stored in the memory of Impact XT8 recording unit.

3. PRESENTATION AND ANALYSIS OF TEST RESULTS

Fig. 2 and Fig. 3 present the results of temperature measurements during hardening of concrete mixtures prepared according to the compositions given in Table 1.

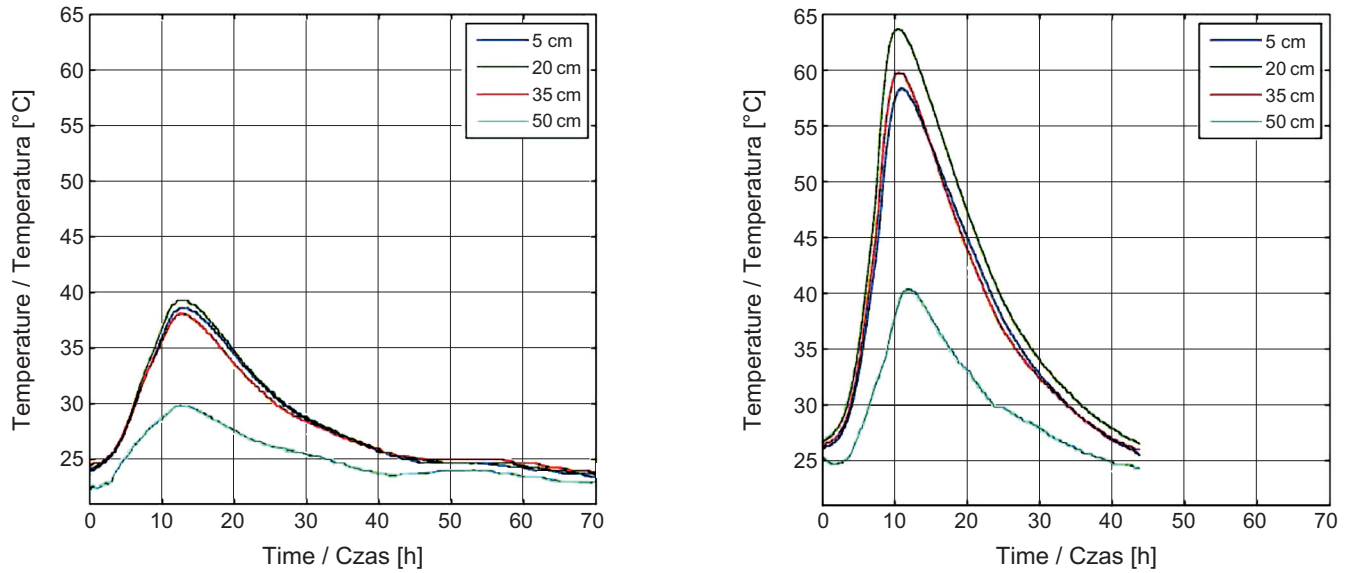


Fig. 2. The temperature distribution in the hardening concrete specimens P50-0 and PP50-0 (excluding calcareous fly ash) in isolated cylindrical molds

Rys. 2. Rozkład temperatury w twardniejących próbkach z betonów P50-0 i PP50-0 (bez popiołu lotnego wapiennego) w izolowanych formach walcowych

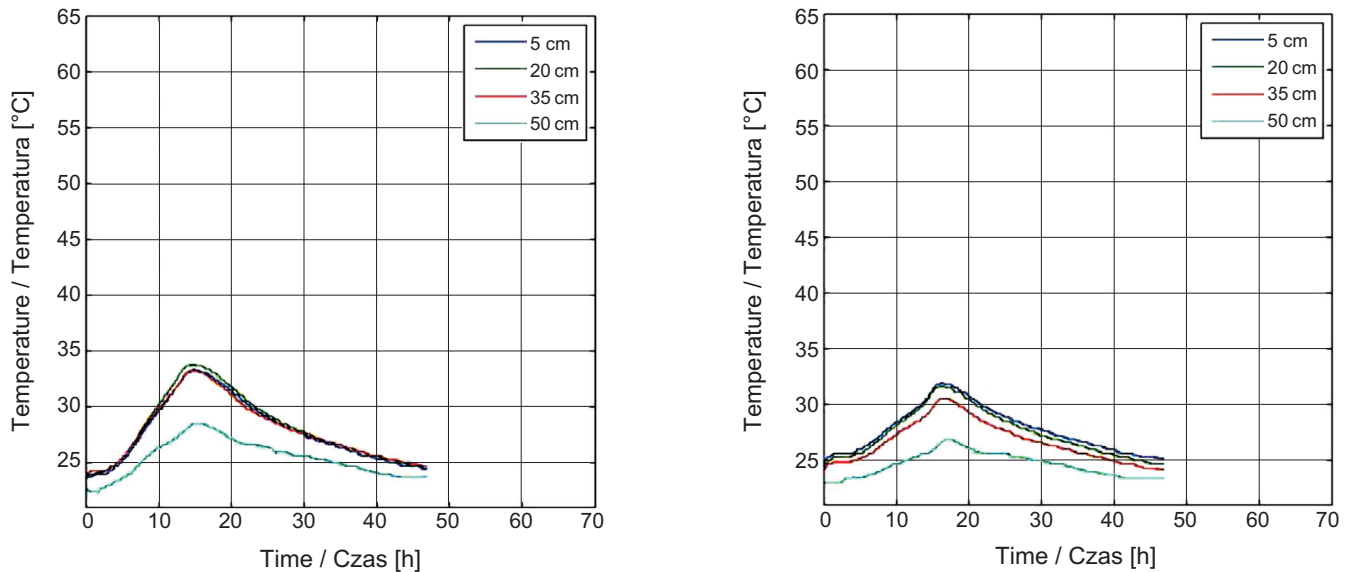


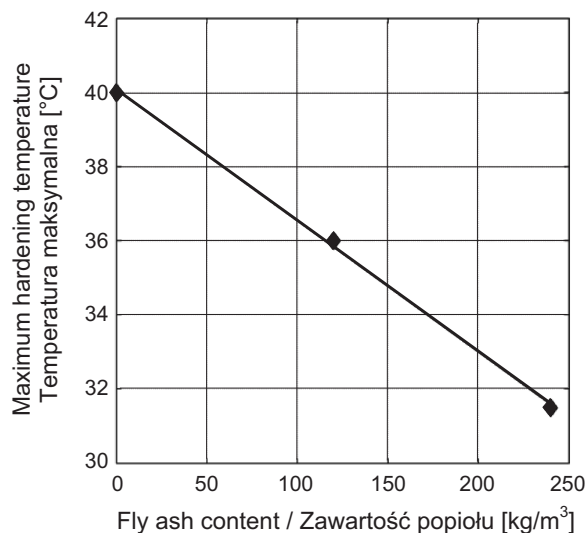
Fig. 3. The temperature distribution in the hardening concrete specimens P50-30 Wm and P50-60 Wm (containing calcareous fly ash which replaces 30% and 60% of cement respectively) in isolated cylindrical molds

Rys. 3. Rozkład temperatury w twardniejących próbkach z betonów P50-30 Wm i P50-60 Wm (zawierających popiół lotny wapienny, zastępujący odpowiednio 30% i 60% cementu) w izolowanych formach walcowych

Zaobserwowano, że typowa zależność temperatury od czasu w wybranym punkcie betonowego walca ma charakter funkcji jednomodalnej (o jednym dominującym maksimum), co pozwala na jednolity opis i ilościowe porównanie właściwości mieszanek o różnej zawartości popiołu W. Wyraźnie widoczny jest efekt obniżania maksymalnej

It has been established that the relationship between the temperature and time at a given point on the concrete cylinder is described by a unimodal function (having one main maximum) which allows uniform description and quantitative comparison of mixtures containing different amounts of calcareous fly ash. The effects include:

temperatury betonu, opóźnienie momentu wystąpienia temperatury maksymalnej, a także zmniejszenie różnicy temperatury w skrajnych punktach pomiarowych. Stwierdzone pozytywne efekty zastosowania popiołu W w mieszankach betonowych pokazano ilościowo na Rys. 4, przy czym gradient temperatury zdefiniowano jako iloraz maksymalnej różnicy temperatury zmierzonej w najbardziej odległych punktach w formie walcowej i odległości między tymi punktami.



lowering the maximum temperature of concrete, delaying the time of maximum temperature and lowering temperature difference between extreme points. These positive effects of calcareous fly ash on the performance of concrete mixtures are illustrated quantitatively in Fig. 4 with the temperature gradient defined as the maximum temperature difference between the extreme measurement points divided by the distance between them.

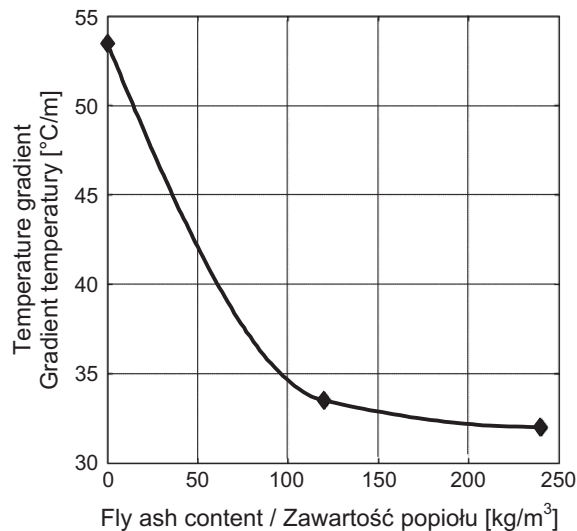


Fig. 4. Influence of calcareous fly ash content as an additive to the concrete mixture on the maximum hardening temperature of concrete (a) and on the temperature gradient (b)

Rys. 4. Wpływ zawartości popiołu lotnego wapiennego stosowanego jako dodatek do mieszanki betonowej na temperaturę maksymalną twardniejącego betonu (a) oraz gradient temperatury (b)

Odczytując z wykresów rozkładu temperatury twardniejącego betonu współrzędne charakterystycznych punktów, wyznaczono wspomniane parametry termiczne i podano je w Tabelicy 4 w przypadku mieszanek betonowych o składzie określonym w Tabelicy 3. Przyjęto tu następujące oznaczenia:

- maksymalna temperatura T_{\max} i czas jej wystąpienia t_{\max} – maksymalna temperatura osiągnięta podczas twardnienia oraz (odpowiednio) czas osiągnięcia tej temperatury,
- maksymalna szybkość wzrostu temperatury $T_{\max} = (dT/dt)_{\max}$ – określona jako iloraz różnicy temperatury w okresie jej wzrostu do czasu trwania tego okresu,
- gradient temperatury ∇T – iloraz maksymalnej różnicy temperatury (zmierzonej w punkcie odległym 50 mm od spodu formy i w punkcie przy górnej powierzchni próbki) do odległości między tymi punktami.

The above-mentioned thermal parameters have been determined in accordance with the coefficients of key points of the curve and compiled in Table 4 for the mixtures with the composition specified in Table 3. The following designations have been assumed:

- maximum fresh concrete temperature T_{\max} and t_{\max} designating the point in time when this temperature was noted,
- maximum rate of temperature increase $T_{\max} = (dT/dt)_{\max}$ – calculated by dividing the temperature difference in the period of its increase by the duration time of this period,
- temperature gradient ∇T – calculated by dividing the maximum difference of temperature (between the point located at 50 mm height above the mould bottom and at the top surface of the specimen) by the distance between these two points.

Table 4. Thermal parameters of hardening concrete made with multicomponent cements containing the W ashes (concrete composition according to Table 3)

Tablica 4. Parametry termiczne twardniejących betonów z cementów wieloskładnikowych zawierających popiół W (skład betonu według Tablicy 3)

Thermal parameter / Parametr termiczny	Designation of concrete mixture / Oznaczenie mieszanki betonowej					
	T50_I	T50_IIB(W)	T50_IIB(S-W)	T50_VA(S-W)	T50_IIA(W)	T50_IIB(V-W)
t_{\max} [h]	11	12.5	15	20.5	14.5	15
T_{\max} [°C]	42.5	37.5	39.5	33	41	39
\dot{T}_{\max} [°C/h]	2	1.6	1.2	0.5	1.5	1.3
∇T [°C/m]	23	13	20	13	22	20

Zaobserwowano, że temperatura maksymalna obniżała się wraz ze wzrostem zawartości popiołu W w cemencie. Efekt obniżenia T_{\max} obserwowano także w przypadku łącznego stosowania żużla i popiołu lotnego wapiennego. Dodatek 15% popiołu lotnego krzemionkowego lub żużla do cementu zawierającego 15% popiołu lotnego wapiennego wywołał obniżenie T_{\max} od 1°C do 2°C. Gradient temperatury w badanych mieszankach z cementami wieloskładnikowymi nie przekroczył 23°C/m. Wyraźne obniżenie gradientu temperatury zaobserwowano w betonach zawierających większą ilość popiołu lotnego wapiennego lub jednoczesny dodatek popiołu lotnego wapiennego oraz żużla wielkopieczowego. Największe obniżenie wartości gradientu temperatury (z 20°C/m do 7°C/m) stwierdzono w betonie na bazie „CEM V/A (S-W)” oraz kruszywa wapiennego. Zastosowanie spoiwa CEM II/B W wywołało obniżenie gradientu temperatury z 20°C/m do 13°C/m w przypadku stosowania kruszywa granodiorytowego.

Na Rys. 5 przedstawiono wpływ zawartości cementu na maksymalny przyrost temperatury w 76 twardniejących mieszankach betonowych. Stwierdzono liniową zależność pomiędzy tymi parametrami, przy czym współczynniki modelu $ax+b$ wraz z 95% przedziałem ufności wynoszą: $a = 0,0042$ (0,037; 0,047), $b = 1,68$ (-0,019; 3,38), zaś współczynnik determinacji $R^2 = 0,81$. Na Rys. 5 za pomocą różnych znaczników wyróżniono mieszanki zawierające różne rodzaje kruszywa grubego. Na podstawie statystycznego testu Manna-Whitneya-Wilcozona nie można przyjąć hipotezy o wpływie rodzaju kruszywa na przyrost temperatury przy 5% poziomie istotności. Konsekwencją silnej korelacji pomiędzy zawartością cementu portlandzkiego w mieszance a maksymalnym zmierzonym przyrostem temperatury jest również liniowa zależność wydzielonego ciepła podczas twardnienia betonu od zawartości cementu w mieszance (Rys. 6). To spostrzeżenie potwierdza poprawność przyjętej procedury interpretacji wyników

The measurements have shown a decrease of the maximum temperature with the increasing amount of calcareous fly ash. A decrease in the value of T_{\max} was noted also when the mixture contained both slag and fly ash. An addition of 15% of siliceous fly ash or slag to cement containing 15% calcareous fly ash resulted in decrease of T_{\max} by 1°C-2°C. In the tested mixtures containing multicomponent cements the temperature gradient did not exceed 23°C/m. A significant decrease of the temperature gradient was noted in the mixtures containing either a higher amount of calcareous fly ash or both calcareous fly ash and blast furnace slag. The greatest drop in the value of the temperature gradient (from 20°C/m to 7°C/m) was noted in the mixture produced with “CEM V/A (S-W)” cement and limestone aggregate. Use of CEM II/B W in the mixture based on granodiorite aggregate decreased the temperature gradient from 20°C/m to 13°C/m.

Fig. 5 presents the influence of the cement content on the maximum increase of temperature in 76 concrete mixtures tested in the research. A linear relationship has been established between these parameters, described by the linear model $ax+b$, with the values of numerical coefficients with 95% confidence interval of $a = 0.0042$ (0.037, 0.047), $b = 1.68$ (-0.019, 3.38) and the coefficient of determination $R^2 = 0.81$. In Fig. 5 the mixtures containing different types of coarse aggregate are distinguished by specific graphical symbols. The Wilcoxon-Mann-Whitney statistical test did not confirm an influence of an aggregate type on a temperature increase at 5% significance level. Strong correlation between the amount of Portland cement and the maximum measured increase of temperature entails also a linear relationship between the amount of heat liberated during hardening of concrete and the amount of cement in the mixture (Fig. 6). This confirms the adequacy of the procedure used in analysis of the measured results. The average value of

pomiarów. Jeśli ilość wydzielonego ciepła na kilogram mieszanki przedstawiona na Rys. 6 zostanie przeliczona na ilość wydzielonego ciepła na kilogram cementu portlandzkiego, to otrzymamy średnią wartość $\langle Q \rangle = 356 \pm 139$ J/g. Typowa ilość ciepła, jaka wydzieliła się w procesie hydratacji cementu portlandzkiego jest zbliżona, zawiera się w przedziale 290-420 J/g [12]. Warto odnotować, że w przypadku małych zawartości cementu portlandzkiego w spoiwie dokładność wyznaczania wydzielonego ciepła zmniejsza się. Z przedstawionych wykresów wynika, że dodatek popiołu lotnego wapiennego z Elektrowni Bełchatów zastępującego część cementu w mieszance betonowej nie ma dużego wpływu na ilość wydzielanego ciepła podczas hydratacji i może być w tym kontekście rozpatrywany jako dodatek pasywny.

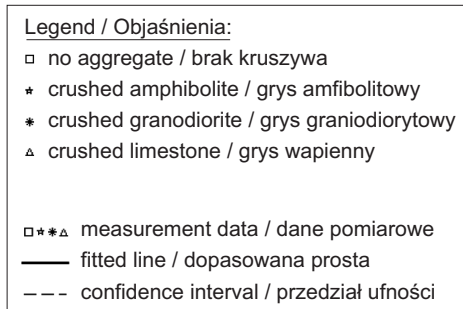


Fig. 5. Influence of the amount of Portland cement on the maximum increase of temperature
 Rys. 5. Wpływ zawartości cementu na maksymalny przyrost temperatury

$\langle Q \rangle = 356 \pm 139$ J/g is obtained upon converting the amount of heat liberated by 1 kg of concrete mixture given in Fig. 6 to the amount of heat liberated by 1 kg of Portland cement. This value is close to the typically adopted amount of heat liberated during hydration of Portland cement which is in the range of 290-420 J/g [12]. It is worthwhile noting that the measurements of liberated heat are less accurate at low proportions of Portland cement in the mixture. The following charts show that calcareous fly ash obtained from Power Station Bełchatów used as a supplementary cementitious material has no significant influence on the amount of liberated heat and, therefore, it is justified to consider it as a passive additive in this respect.

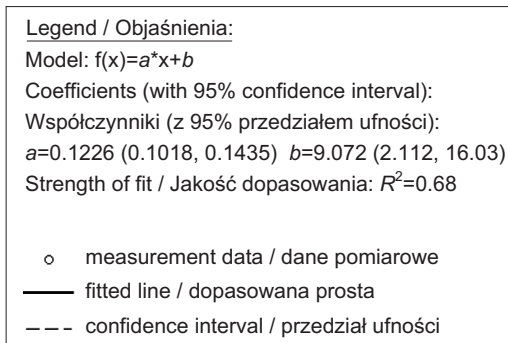
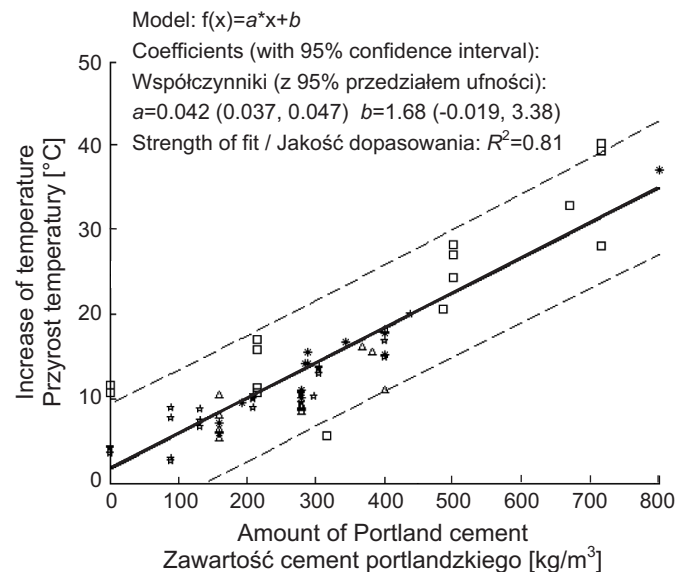
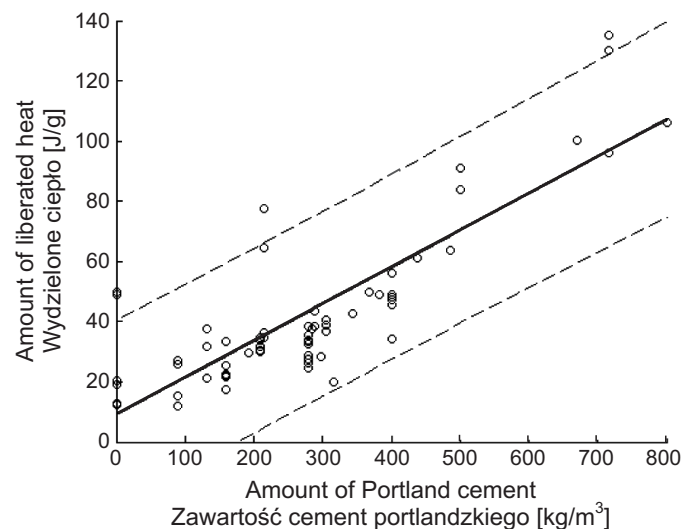


Fig. 6. Heat liberated during the first 72 hours as a function of the amount of Portland cement in the concrete mixture
 Rys. 6. Ciepło wydzielone w ciągu pierwszych 72 godzin jako funkcja zawartości cementu portlandzkiego w betonie



Z analizy wyników pomiarów przedstawionych na Rys. 7 wynika brak wyraźnej, liniowej zależności pomiędzy maksymalnym przyrostem temperatury a czasem wystąpienia maksimum. Zaobserwowano natomiast silną, ujemną korelację pomiędzy zawartością kruszywa w mieszankach bez dodatku popiołu lotnego, a zarejestrowanym maksymalnym przyrostem temperatury. Zależność czasu wystąpienia temperatury maksymalnej od zawartości popiołu W w mieszance betonowej, przy uwzględnieniu zawartości kruszywa, pokazano na Rys. 8. Zbiór pomiarów podzielony został na 4 grupy mieszanek o zawartości kruszywa odpowiednio 860 kg/m³, 1650 kg/m³, 1750 kg/m³ oraz 2060 kg/m³. W trzech przypadkach uzyskano istotną, dodatnią korelację pomiędzy zawartością popiołu lotnego, a czasem wystąpienia maksimum temperatury. Obliczone wartości korelacji wynoszą odpowiednio $\rho = 0,78$; 0,88; 0,54; 0,94.

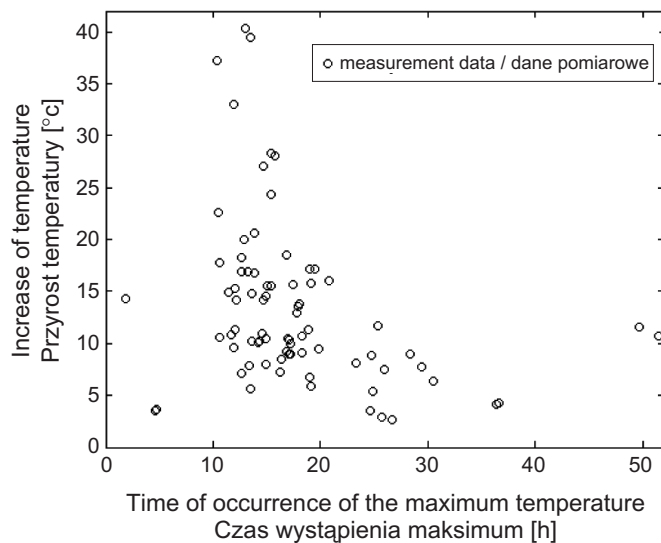


Fig. 7. Maximum temperature increase as a function of the time of occurrence of the maximum temperature
Rys. 7. Maksymalny przyrost temperatury w funkcji czasu wystąpienia wartości maksymalnej

Na podstawie pomiarów polowych w Tabelicy 5 podano parametry termiczne twardniejących mieszanek zawierających różne cementy wieloskładnikowe, zawierające popiół lotny wapienny, zgodnie z Tablicą 3. Przyjęto analogiczne oznaczenia jak w Tabelicy 4, przy czym gradienty temperatury ∇T_1 i ∇T_2 zostały zdefiniowane odpowiednio jako iloraz maksymalnej różnicy temperatury zmierzonej w punktach odległych o 50 i 400 mm od spodu formy do odległości między tymi punktami oraz jako iloraz maksymalnej

The measurement results presented in Fig. 7 show that there is apparently no clear linear relationship between the maximum increase of temperature and the time of its occurrence. On the other hand, a strong negative correlation has been noted between the amount of aggregate in mixtures produced without fly ash addition and the recorded maximum increase of temperature. Fig. 8 presents the relationship between the time of occurrence of the maximum temperature and the content of calcareous fly ash for different amounts of aggregate. The whole set of measurement results has been subdivided into 4 groups according to the quantity of aggregate added to the mixture, namely 860 kg/m³, 1650 kg/m³, 1750 kg/m³ and 2060 kg/m³. A significant, positive correlation between the content of calcareous fly ash and the time of occurrence of the maximum temperature was obtained in three cases. The following correlation values were obtained: $\rho = 0.78$, 0.88, 0.54, 0.94.

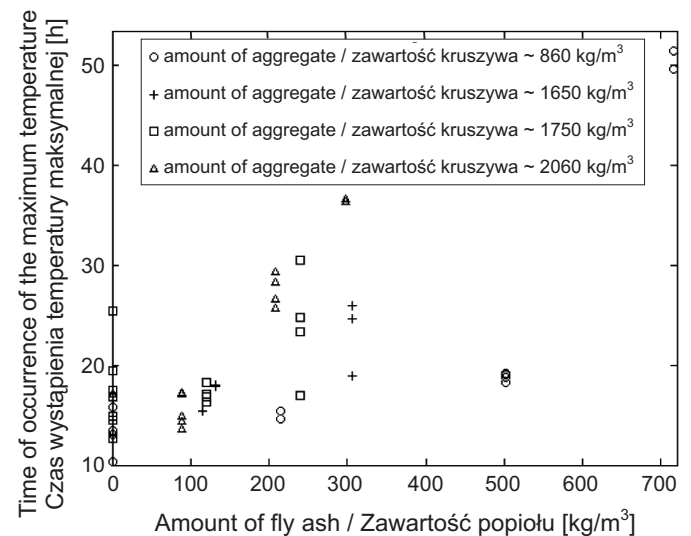


Fig. 8. Time of occurrence of maximum temperature as a function of calcareous fly ash content for different quantities of aggregate

Rys. 8. Czas wystąpienia temperatury maksymalnej jako funkcja zawartości popiołu W w mieszance w stosunku do różnej zawartości kruszywa

Table 5 above presents the thermal parameters during concrete mixtures hardening prepared according to Table 3 and containing various multicomponent cements, composed of calcareous fly ash, among others. The designations are the same as previously used in Table 4 and the temperature gradients ∇T_1 and ∇T_2 are calculated respectively as the maximum temperature differences between the points at 50 mm and 400 mm heights above the mould

różnicy temperatury zmierzonej w punkcie odległym o 50 mm od spodu formy i w punkcie przy górnej powierzchni próbki do odległości między tymi punktami. Ponadto wyznaczono parametr ΔT_{\max} – maksymalną różnicę temperatury zarejestrowaną podczas pomiaru. Zaobserwowano obniżenie temperatury maksymalnej wraz ze wzrostem zawartości popiołu W w cemencie. Zmierzone gradienty temperatury w blokach masywnych były zbliżone do wartości uzyskanych z pomiarów w formie walcowej.

bottom and between the point at 50 mm height above the mould bottom and the point located on the specimen top, divided by their respective distances. In addition, the parameter ΔT_{\max} – the maximum temperature difference recorded during the measurement – was determined. A decrease of the maximum temperature with the increasing amount of calcareous fly ash was noted. The temperature gradients measured on massive concrete blocks were similar to the values obtained on cylindrical specimens.

Table 5. Thermal parameters of hardening concrete – field tests
Tablica 5. Parametry termiczne twardniejących betonów – pomiary polowe

Thermal parameter / Parametr termiczny	Concrete mixture designation / Oznaczenie mieszanki betonowej					
	W50 I	W50 II AW	W50 II BW	W50 II BVW	W50 V ASW	W50 II BSW
t_{\max} [h]	39.0	39.8	42.0	35.0	50.5	45.8
T_{\max} [°C]	51.4	44.4	36.3	38.1	36.7	46.0
ΔT_{\max} [°C]	19.1	18.9	11.3	13.8	12.6	17.0
\dot{T}_{\max} [°C/h]	1.08	0.86	0.61	0.83	0.49	0.76
∇T_1 [°C/m]	14.86	4.86	17.71	12.86	7.14	9.43
∇T_2 [°C/m]	18.14	16.71	9.42	10.43	14.14	18.29

Na Rys. 9 przedstawiono porównanie maksymalnych przyrostów temperatury w blokach betonowych i formie walcowej w przypadku sześciu mieszanek o składzie według Tablicy 3. Stwierdzono jakościową zgodność rezultatów: wyższa temperatura maksymalna w próbce walcowej odpowiada wyższej temperaturze maksymalnej zmierzonej w bloku masywnym. Zatem pomiary temperatury twardniejących mieszanek betonowych wykonywane w stosunkowo małych formach walcowych zapewniają poprawne uszeregowanie jakościowe mieszanek pod względem ich własności termicznych, zwłaszcza maksymalnej temperatury, jaka może wystąpić w czasie twardnienia w elementach masywnych.

Fig. 9. Comparison of the maximum temperature rise in large concrete blocks and in a cylindrical mold
Rys. 9. Porównanie maksymalnych przyrostów temperatury w blokach betonowych i formie walcowej

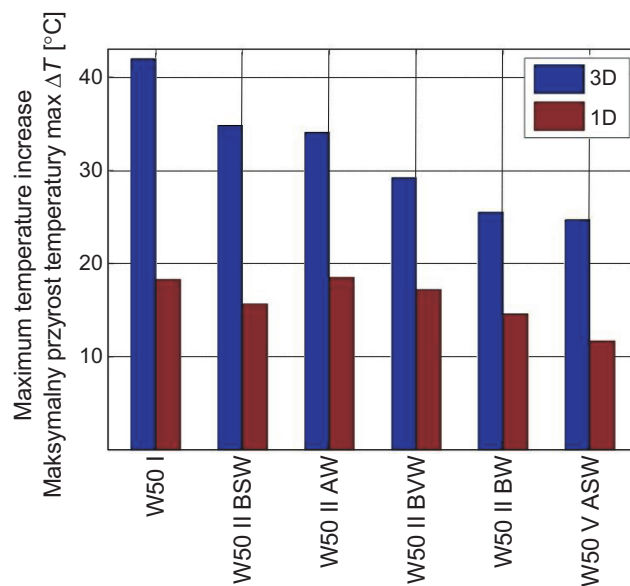


Fig. 9 presents the maximum increases of temperature measured on concrete blocks and on the cylindrical specimens made of the six mixtures prepared according to Table 3. The following correspondence was established between the results: a higher maximum temperature measured on cylindrical specimen corresponds to a higher

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych zbadano relacje pomiędzy składnikami mieszanki betonowej i wybranymi parametrami, charakteryzującymi rozkład

temperatury w betonie podczas 72 godzin od zarobienia mieszanki. Opracowana procedura pomiarowa i sposób interpretacji wyników zostały pozytywnie zweryfikowane: metoda umożliwiła rozróżnienie pod względem właściwości termicznych mieszanek betonowych o zmiennej zawartości dodatków mineralnych i różnych rodzajach kruszywa. Ponadto stwierdzono, że dodatek popiołu W powoduje obniżenie temperatury maksymalnej betonu i opóźnienie czasu jej wystąpienia. Można sformułować następujące, szczegółowe wnioski:

1. Dodatek popiołu lotnego wapiennego zastępującego część cementu w mieszance betonowej nie powodował istotnych zmian jakościowych przebiegu temperatury twardniejącego betonu, ale znacząco wpływał na ilościowe parametry przebiegu temperatury.
2. Dodatek popiołu W spowodował obniżenie temperatury szczytowej T_{\max} o $4,2^{\circ}\text{C}$ na każde 100 kg/m^3 dodatku popiołu, opóźnienie czasu jej wystąpienia t_{\max} o $3,2\text{ h}$ na każde 100 kg/m^3 dodatku popiołu; znaczącemu zmniejszeniu uległy też maksymalne pochodne czasowe \dot{T}_{\max} oraz gradienty temperatury ∇T_{\max} . Zaobserwowane zależności wymienionych parametrów od zawartości popiołu w badanym zakresie były w przybliżeniu liniowe.
3. Rozkład czasu wystąpienia temperatury maksymalnej nie zależał od temperatury otoczenia.
4. Uzyskano zbliżoną do liniowej zależność czasu wystąpienia temperatury maksymalnej od zawartości dodatku popiołu W do mieszanki betonowej pomimo zróżnicowania składu chemicznego i właściwości fizycznych popiołów pobieranych pięciokrotnie z Elektrowni Bełchatów w okresie 18 miesięcy.

Połowe pomiary temperatury twardniejącego betonu potwierdziły korzystne efekty zastosowania popiołu W:

1. Wskutek 30% zastąpienia cementu popiołem W maksymalny przyrost temperatury betonu obniżył się o $6-7^{\circ}\text{C}$, natomiast czas wystąpienia temperatury szczytowej opóźnił się o około 8 godzin.
2. W przypadku cementów zawierających 15-30% popiołu W w składzie cementów wieloskładnikowych maksymalny przyrost temperatury betonu obniżył się o 8°C przy 15% zastąpienia cementu i 16°C przy 30% zastąpienia, natomiast czas wystąpienia temperatury szczytowej opóźnił się odpowiednio o 1 godzinę i o 3 godziny.

maximum temperature measured on the concrete block. Therefore it can be concluded that the temperature measurements carried out on relatively small cylindrical moulds enable correct rating of the mixtures in terms of their thermal properties, including in particular the maximum temperature which may occur during hardening of massive concrete elements.

4. CONCLUSIONS

The experimental tests carried out for the purpose of the present research were used to establish relationships between the constituents of concrete mixtures and certain parameters defining the temperature distribution in concrete during the first 72 hours from mixing. The measurement procedure and the method of analysis used in the present research were proven to be correct as the method enabled differentiation of concrete mixtures in terms of their thermal properties depending on the content of mineral admixtures and aggregate type. Moreover, it has been established that addition of calcareous fly reduces the maximum temperature and delays the time of its occurrence. Finally, we can conclude that:

1. Substituting a portion of Portland cement with calcareous fly ash has not caused any significant qualitative changes to the pattern of temperature changes of hardening concrete but it had a significant quantitative effect on this pattern.
2. Addition of calcareous fly ash lowered the maximum temperature T_{\max} by 4.2°C and delayed the time of its occurrence t_{\max} by 3.2 h for each 100 kg added to 1 m^3 of the mixture. A significant decrease was noted also in the values of maximum time derivatives \dot{T}_{\max} and in the temperature gradients ∇T_{\max} . Approximately linear relationships were established between these parameters and the content of fly ash within the tested range.
3. The distribution of the time of occurrence of the maximum temperature of concrete does not depend on the temperature of the surrounding air.
4. Approximately linear relationship was established between the time of occurrence of the maximum temperature and the amount of calcareous fly ash, despite varying chemical and physical properties of the material obtained from the Bełchatów Power Station in the period of 18 months in five lots.

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] *Kiernozycycki W.*: Betonowe konstrukcje masywne. Teoria, wymiarowanie, realizacja. Polski Cement, Kraków, 2003
- [2] *Witakowski P.*: Termodynamiczna teoria dojrzewania. Zastosowanie do konstrukcji masywnych z betonu. Politechnika Krakowska, Inżynieria Lądowa, Zeszyt naukowy nr 1, Kraków, 1998
- [3] *Chładzyński S., Garbacik A.*: Cementy wieloskładnikowe w budownictwie. Polski Cement, Kraków, 2008
- [4] *Knor G., Glinicki M.A., Holnicki-Szulc J.*: Determination of thermal properties of hardening concrete by means of inverse problem solution. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, **11**, 4, 2012, 281 - 294
- [5] *Malhotra V.M., Mehta P.K.*: High performance high-volume fly ash concrete. Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc., Ottawa, 2005
- [6] *Tsimas S., Moutsatsou-Tsima A.*: High-calcium fly ash as the fourth constituent in concrete: problems, solutions and perspectives. *Cement and Concrete Composites*, **27**, 2, 2005, 231 - 237
- [7] *Bentz D.P., Peltz M.A., Duran-Herrera A., Valdez P., Juarez C.A.*: Thermal properties of high-volume fly ash mortars and concretes. *Journal of Building Physics*, **34**, 3, 2011, 263 - 275
- [8] *Bentz D.P., Sato T., De la Varga I., Weiss W.J.*: Fine limestone additions to regulate setting in high volume fly ash mixtures. *Cement and Concrete Composites*, **34**, 1, 2012, 11 - 17
- [9] *Baran T., Drożdż W., Pichniarczyk P.*: Zastosowanie popiołów lotnych wapiennych do produkcji cementu i betonu. *Cement Wapno Beton*, **79**, 1, 2012, 50 - 56
- [10] *Dąbrowski M., Glinicki M.A.*: Air void system parameters and frost resistance of air-entrained concrete containing calcareous fly ash. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, **12**, 1, 2013, 41 - 55

The following positive effects of adding calcareous fly ash have been confirmed through field measurements of temperature of hardening concrete:

1. As a result of substituting 30% of Portland cement with calcareous fly ash the increase of temperature dropped by 6-7°C and the time of occurrence of the maximum temperature was delayed by ca. 8 hours.
2. In multicomponent cements containing 15-30% of calcareous fly ash the maximum temperature decreased by 8°C and 16°C and the time of its occurrence was delayed by 1 hour and 3 hours for substitution rates of 15% and 30%, respectively.

ACKNOWLEDGEMENT

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

- [11] *Ossowski A., Dąbrowski M., Glinicki M.A., Ranachowski Z.*: Thermal properties of concretes made of blended cements with addition of high calcium fly ash of Belchatow power plant. Międzynarodowa Konferencja „Popioły z energetyki”, Ekotech, Sopot, 2012, 1 - 12 (in Polish)
- [12] ACI Committee, Mass Concrete for Dams and other Massive Concrete Structures, *ACI Journal*, **67**, 4, 1970, 273 - 309

NORMY / STANDARDS

PN-EN 196-9 Metody badania cementu – Część 9: Ciepło hydratacji. Metoda semiadiabatyczna

PN-EN 197-1 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku