

ANNA KOTWA

Kielce University of Technology
Faculty of Civil and Environmental Engineering
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
25-314 Kielce, Poland

e-mail: a.ceglarska@tu.kielce.pl

INFLUENCE OF SUB-ZERO TEMPERATURE AND INITIAL SET TIME ON THE PROPERTIES OF HARDENED CONCRETE

Abstract

This study covered the issues of concreting in low temperatures. The analysis concerned the effect of gradual cooling of fresh concrete on compressive strength drops after 28 days of maturing. The investigations were conducted for specimens of class C20/25 concrete prepared from cements: CEM I 32.5R, CEM I 42.5R, CEM II/B-V 42.5R and dolomite aggregate. The linear relationship between the concrete volume gain and strength drop was determined.

Keywords: compressive strength, sub – zero temperature

1. Introduction

Cold weather concreting requires creating such conditions for concrete maturing that ensure obtaining the highest concrete strength in the shortest time. Cold weather is defined as a period when the average daily temperature falls below 5°C, and the minimum temperature falls below 0°C [1]. National guidelines related to concreting performed in the winter months are included in ITB Guidelines No. 282 [2]. The document recommends, depending on the cement type used, sample setting times for various concretes at steady actual temperatures (0°C – 30°C). In reality, concrete matures at variable temperatures, which impedes the determination of its strength. Estimating the strength development on the basis of the guidelines above can lead to errors. It is then necessary to skilfully choose the suitable basic inalterable procedures and combine them with the latest advancements in materials technology [3]. Obtaining data on actual concrete strength on the basis of maturity function is a fundamental problem in engineering approach.

The codes define the strength value, f_{cmin} , having reached which, the concrete is deemed frost-resistant. Canadian Standards Association CSA recommends minimum compressive strength of the order of 7.0 MPa, whereas American Concrete Institute ACI accepts the value of more than 3.5 MPa. Swedish code

prescribes the minimum strength of the order of 5.0 MPa. According to Neville, $f_{cmin} = 3.5$ MPa, in other authors $f_{cmin} = 2$ MPa for Portland cements concretes. The question arises how much time is necessary for the concrete to achieve the designed strength. The specified strength, especially the setting period, is directly connected with other important aspects such as the removal of framework and establishing the load the concrete element is able to withstand [4].

The assessment of the compressive strength is expressed with the aid of maturity function dependent on temperature and curing time. The basic difficulty is adopting the proper cement activation energy. It is recommended that such energies be determined experimentally [5].

The paper presents the test results for concrete specimens subject to one-time freezing at temperatures –3°C and –8°C following the initial curing period of 2 to 8 h. The determined values included strength gain and drop as well as the concrete deformation. The objectives included determination of the relationship between then concrete strength drops and deformations occurred during freezing of the fresh concrete, and determination of activation energies.

2. Research design

The tests were conducted with concrete specimens made from three cement types:

CEM I 32.5R (A), CEM I 42.5R (B) and CEM II/B-V 32.5R (C). The concrete mixtures were prepared at the same ration of water/cement content $w/c=0.54$. The first run of the test was focused on the determination of concrete compressive strength drops. 480 specimens of concrete class C20/25 were made.

Table 1. Concrete mix composition

Concrete mix components	Quantity [kg/m ³]
Cement	334
Sand 0-2 mm	625
Aggregate 4/8 mm	581
Aggregate 8/16 mm	581
Water	181

A parallel test was performed on frozen specimens and on witness concrete specimens which cured under laboratory conditions in the water bath of the temperature of +18°C. Each set was immersed in water, subject to initial maturity process for the period of $t_0 = 2, 5, 8$ hours. Then the specimens were carried to the environmental chamber, where they were cooled in the air to the temperature of $T_{min} = -3°C, -8°C$ for 15, 24, 36 hours. After that time the specimens cured till day 28 in the water of the temperature of +18°C. Concrete compressive strength was determined after 2, 5, 8, 16, 24, 36, 48 h and 3, 7, 28 days.

The test formwork mould was made of 5 cm thick polystyrene panels; the bottom of the mould was 1 mm thick metal sheet, cemented to the polystyrene. In order to create conditions for determining the strength of the fresh concrete, the specimens were compressed together with the polystyrene mould, using a 100x100x20 mm upper platen (Fig. 1). The specimens to be taken out of moulds were made in plastic moulds. After the removal of the moulds, the specimens were insulated on the four sides with 5 cm thick polystyrene.

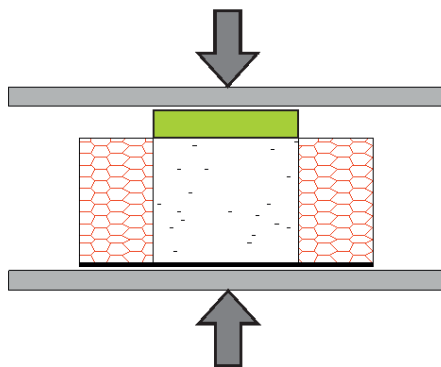


Fig. 1. Specimen under compression-press test

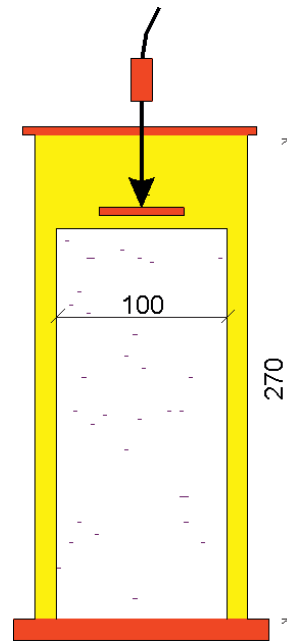


Fig. 2. Deformation measurement

The second cycle of tests was focused on measuring frozen concrete deformations. Cylindrical specimens 27 cm in height and 10 cm in diameter (Fig. 2) were placed in moulds and subjected to initial maturing at the ages of 2, 5, 8, 16, 24 and 36 h at the temperature of +15°C. After that, they were cooled one time to temperatures of -5°C, -10°C. The deformation sensor, placed vertically from the top measured the deformations, which were recorded together with the temperature changes inside the specimen.

The third cycle of tests was designed to determine the early strength gain of concrete specimens, which having been placed in moulds, matured for the period of 28 days at steady temperatures of +5°C, +20°C, +35°C. Compressive strength was assessed after 2, 5, 8, 16, 24, 36, 48 h and 3, 7, 28 days.

The tests designed in that way made it possible to determine both, activation energies and the relationship between deformations and compressive strength drops.

3. Analysis of the results

The diagrams below presents the gains in early strength for concretes maturing at steady temperatures of +5°C, +20°C, +35°C made from cements designated as A, B, C.

The type of cement used in the concrete mix has a decisive importance for the gain in early compressive strength. The highest gain was recidred for the concrete made from CEM I 42,5R cement maturing at constant temperature of +35°C.

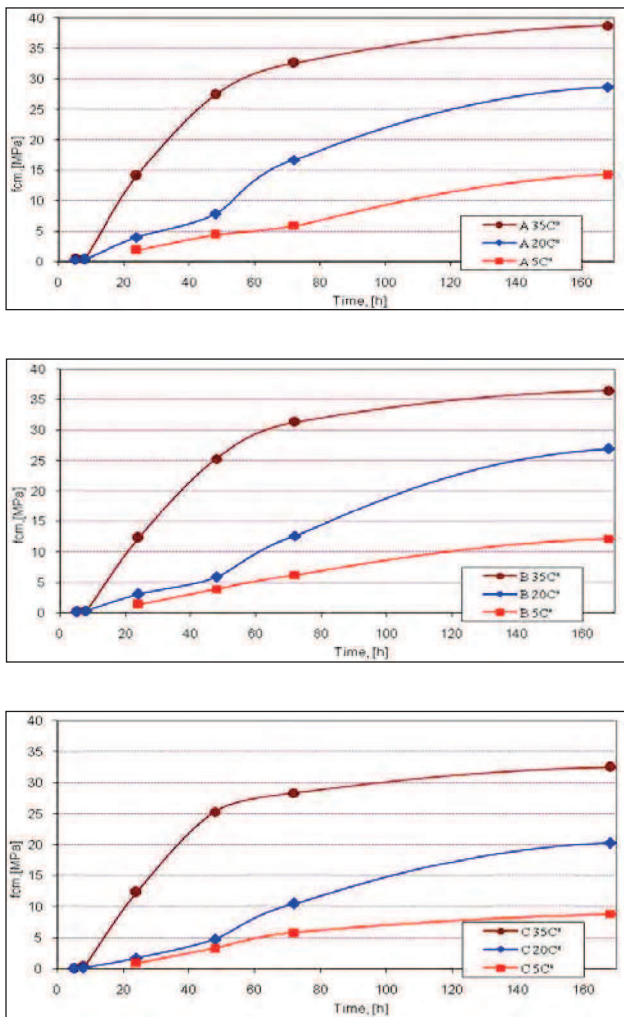


Fig. 3. Compressive strength gain for concrete placed in water to mature at the temperatures of +5°C, +20°C, +35°C made of cements A, B, C

Specimens made from cements A, B, C were subjected to initial maturing at the age of 2, 5, 8 h above the water at the temperature of +18°C, prior to being cooled one time to temperatures -3°C, -8°C. The results of the measurements are presented in Figure 4. The analysis of the results indicated that the shorter the time of initial maturing and the lower the freezing temperature, the higher strength drops. The general tendency is, that the lower strength at the moment the concrete freezes, the higher compressive strength drops. The highest strength drop, 52.3%, was recorded for concrete made from CEM II/B-V 32,5R cement, which was frozen to the temperature of -8°C after 2 hours of initial maturing. The lowest strength drop, 11.8%, was recorded for concrete made from CEM I 42,5R cement, cooled to the temperature of -3°C after 8h of initial maturing.

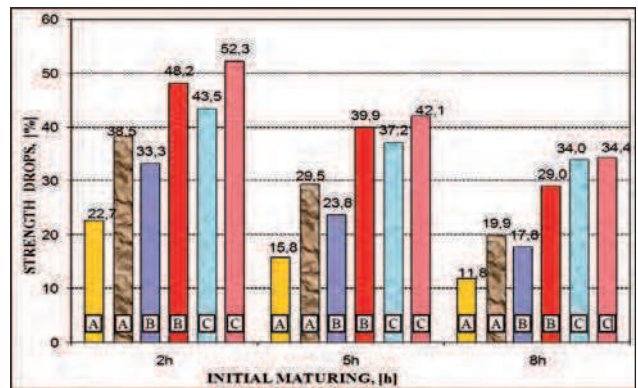


Fig. 4. Strength drops for concretes subjected to one-time freezing to temperatures of -3°C, -8°C

In an effort to describe the results obtained from the tests the maturity functions proposed by A.M. Neville and recommended by ITB Guidelines No. 282 were used. The application of those functions to concretes tested in this study leads to serious errors. In fact, the calculated values are much higher than the strength value obtained in the tests. Overestimation for concretes in the initial phase of maturing can reach 100%.

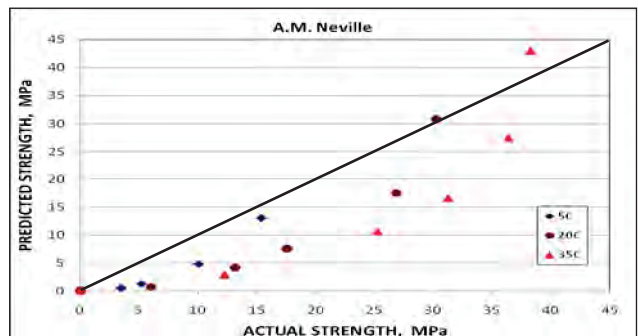


Fig. 5. Compressive strength predicted by the maturity function specified by A.M. Neville in relation to the values obtained from the tests

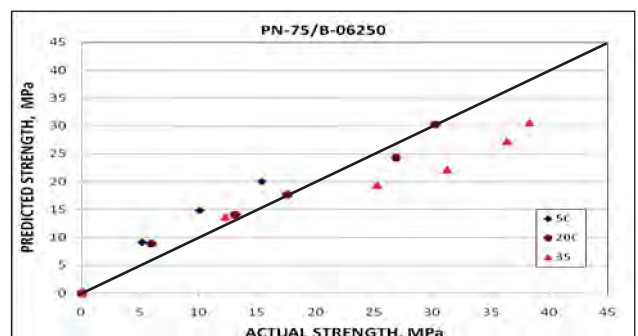


Fig. 6. Compressive strength predicted by the maturity function specified by ITB Guidelines No. 282 in relation to the values obtained from the tests

With the aid of the maturity function specified by Hansen and Pedersen, helping determine the

compressive strength of concrete in relation to its temperature and age, activation energies E_a were determined experimentally for the cements in Table 2.

Table 2. Activation energies E_a for particular cements

Cement	CEM I 42,5R	CEM I 32,5R	CEM II/B-V 32,5R
Activation energy, E_a [kJ/mol]	44	40	12

The activation energies for the tested cements help accurately assess compressive strength in relation to temperature and maturing time. For Portland cements ASTM C 1074 standard specifies the range $E_a = 40-45$ kJ/mol [5]. The value of up to 26 kJ/mol is recommended for Portland cement with ash content.

Application of different cements has a decisive effect on the change volume in the fresh concrete cooled one time at the one-way heat transfer. The charts indicate an evident linear correlation between deformations and compressive strength drops. It can be concluded that the type of cement used in the mix does not affect the relationship in a significant way. The parameters can also be used interchangeably. Instead of conducting burdensome measurements of strength drops, we can measure the deformations.

Proving the linear dependence is vital in practice as establishing volume changes is less labour and time consuming than establishing concrete strength drops.

4. Summary

The results of the conducted research indicate quite close relationship between deformations and one-time frozen concrete strength drops. By measuring the deformations we can establish strength drops after 28 days of maturing for one-time frozen specimens. In order to confirm the results obtained from the tests, further research is necessary. A general trend can be seen after the results analysis; concrete frozen to a lower temperature following a shorter initial maturing period shows the highest compressive strength drops. The determined activation energies help establish actual compressive strength in relation to concrete time history and temperature.

References

- [1] Jamróży Z., *Beton i jego technologie/Concrete and its technologies*, PWN, Warszawa 2003 [in Polish].
- [2] ITB Guidelines No. 282, *Guidelines for construction and assembly works in the period of low temperatures*, Warszawa 1995 [in Polish].
- [3] Bajorek G., *Betonowanie zimą/Winter concreting*. Construction, Technology Architecture, Polish Cement, October 2007, No. 4, pp. 48-53 [in Polish].
- [4] Jasiczak J., *Wpływ okresowego zamrożenia betonu zwykłego i modyfikowanego domieszkami na ich 28-dniową wytrzymałość/Effect of temporary freezing of ordinary and modified concrete on its 28-day strength*, XVI Scientific Conference, Jadwisin 1998.
- [5] ASTM C 1074, 1998, "Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method", 2000 ASTM Standards, Vol. 04.02, ASTM, West Conshohocken, PA.

The research described above was partially financed from grant No. POIG 01.01.02-10-106/09-00.

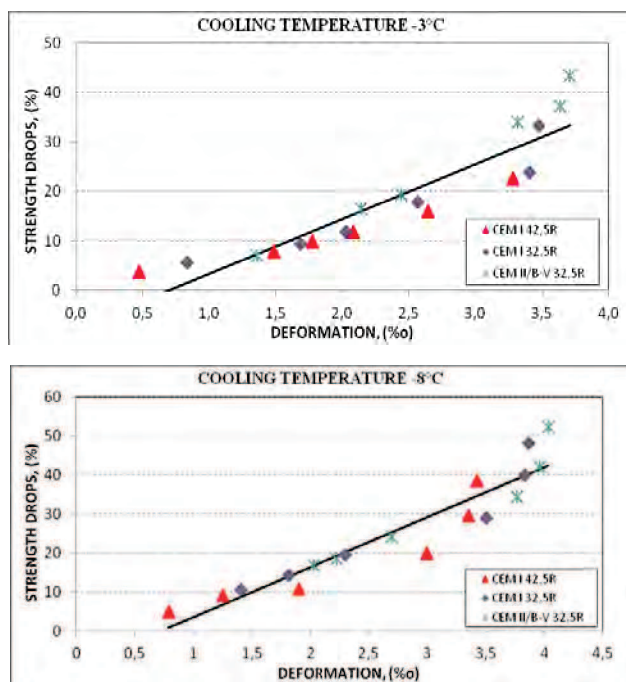


Fig. 7. Concrete strength drop-deformation size relationship

Anna Kotwa

Wpływ temperatury ujemnej i czasu wstępnego dojrzewania na właściwości stwardniałego betonu

1. Wprowadzenie

Przy wykonywaniu robót betonowych w obniżonej temperaturze zaleca się stworzenie warunków dojrzewania pozwalających na uzyskanie najwyższej wytrzymałości betonu w jak najkrótszym czasie. Przez pojęcie niskiej temperatury należy rozumieć okres, w którym średnia temperatura dobową jest niższa od $+5^{\circ}\text{C}$, a temperatura minimalna spada poniżej 0°C [1]. Krajowymi wytycznymi dotyczącymi robót betonowych prowadzonych w okresie zimowym jest Instrukcja ITB nr 282 [2], która podaje w formie tabelarycznej, w zależności od rodzaju cementu, przykładowe czasy twardnienia poszczególnych betonów w stałych temperaturach rzeczywistych (0°C - 30°C). W rzeczywistości beton dojrzewa w zmiennych temperaturach, co utrudnia określenie wytrzymałości. Szacowanie wytrzymałości na podstawie Instrukcji ITB prowadzić może do błędnych wartości. Trzeba zatem umiejętnie wybrać te podstawowe niezmiennie reguły postępowania i połączyć je z najnowszymi osiągnięciami technologiczno-materiałowymi [3]. Podstawowym problemem w podejściu inżynierskim jest uzyskanie informacji o rzeczywistej wytrzymałości w oparciu o funkcję dojrzalsości, która wiąże rzeczywistą wytrzymałość z dojrzalsością betonu.

Zalecenia najczęściej określają wartość wytrzymałości f_{cmin} , po uzyskaniu której beton uważa się za odporny na działanie mrozu. CSA Standard w Kanadzie zaleca uzyskanie przez beton minimalnej wytrzymałości na ściskanie na poziomie $7,0\text{ MPa}$, natomiast ACI przyjmuje wytrzymałość powyżej $3,5\text{ MPa}$. Szwedzi zalecają uzyskanie przez beton minimalnej wytrzymałości wynoszącej $5,0\text{ MPa}$. Neville zaleca wytrzymałość $f_{\text{cmin}} = 3,5\text{ MPa}$, inni autorzy $f_{\text{cmin}} = 2\text{ MPa}$ dla betonów z cementu portlandzkiego. Pojawia się problem związany z określeniem czasu, jaki jest potrzebny aby beton uzyskał oczekiwaną wytrzymałość. Uzyskanie tej wytrzymałości, a zwłaszcza czas potrzebny do jej uzyskania, bezpośrednio wiąże się z innymi ważnymi aspektami, a mianowicie z problemem rozdeskowania betonowego elementu, a także

określenia stopnia w jakim można obciążyć wykonany element [4].

Szacowanie wytrzymałości na ściskanie opisuje się za pomocą [5] funkcji dojrzalsości w zależności od temperatury i czasu dojrzewania. Podstawową trudnością jest przyjęcie odpowiedniej wartości współczynnika aktywacji cementu. Zaleca się, aby takie współczynniki wyznaczano doświadczalnie.

W artykule przedstawiono wyniki badań próbek betonowych poddanych jednokrotnemu zamrożeniu do temperatur -3°C i -8°C po wstępnym okresie dojrzewania wynoszącym od 2 do 8 h. Oznaczano przyrost i spadek wytrzymałości oraz odkształcenia betonu. Celem badań było określenie zależności pomiędzy spadkami wytrzymałości a odkształceniami powstałymi podczas zamrażania młodego betonu oraz wyznaczenie współczynników aktywacji.

2. Badania własne

Badania przeprowadzono na próbkach betonowych wykonanych z trzech cementów CEM I 32,5R (ozn. A), CEM I 42,5R (ozn. B) oraz CEM II/B-V 32,5R (ozn. C). Mieszanki betonowe do pomiarów przygotowane zostały przy jednakowym stosunku $w/c = 0,54$. Pierwsza seria badań dotyczyła określenia spadków wytrzymałości betonu na ściskanie. Zakres badań obejmował wykonanie 480 próbek z betonu klasy C20/25.

Równoległe prowadzono badania na próbkach zamrażanych i próbkach świadkach dojrzewających w warunkach laboratoryjnych w wodzie o temperaturze $+18^{\circ}\text{C}$. Każda seria umieszczana była nad wodą, gdzie podlegała wstępnemu dojrzewaniu przez okres $t_0 = 2, 5, 8$ godzin, a następnie próbki przenoszono do komory klimatyzacyjnej gdzie podlegały schładzaniu w powietrzu do temperatur $T_{\text{min}} = -3^{\circ}\text{C}$, -8°C przez okres 15, 24, 36 godzin. Po tym czasie próbki dojrzewały do 28 dnia w wodzie w temperaturze $+18^{\circ}\text{C}$. Spadki wytrzymałości betonu na ściskanie określano po upływie 2, 5, 8, 16, 24, 36, 48 godzin oraz 3, 7, 28 dni.

Formę do badań wykonano z płyt styropianu o grubości 5 cm , zaś dno formy stanowiła blacha o grubo-

ści 1 mm, która była przyklejona do styropianu. Aby umożliwić określenie wytrzymałości młodego betonu, próbki ściskano razem z formą styropianową, a na górze zastosowano podkładkę metalową 100x100x20 mm (rys. 1). Próbki, które nadawały się do rozformowania wykonywane były w formach plastikowych. Po rozformowaniu próbki izolowane były z czterech stron styropianem o grubości 5 cm.

Druga seria badań dotyczyła pomiaru odkształceń zamrożonego betonu. Do badań zastosowano próbki w kształcie walca o wysokości 27 cm i średnicy 10 cm (rys. 2), które po zaformowaniu podlegały wstępnemu dojrzewaniu przez okres 2, 5, 8, 16, 24, 36 godzin w temperaturze +15°C. Po tym czasie próbki podlegały jednokrotnemu schłodzeniu do temperatur -5°C, -10°C. Pomiar odkształceń następował za pomocą czujnika odkształceń umieszczonego pionowo od góry. Rejestrowano przebieg odkształceń i zmian temperatury wewnątrz próbek.

Trzecia seria badań polegała na określeniu przyrostu wczesnej wytrzymałości próbek betonowych, które po zaformowaniu dojrzewały przez okres 28 dni w stałych temperaturach +5°C, +20°C, +35°C. Wytrzymałość na ściskanie określano po 2, 5, 8, 16, 24, 36, 48 godzinach oraz po 3, 7, 28 dniach.

W ten sposób zaplanowane badania pozwoliły na określenie zależności pomiędzy odkształceniami a spadkami wytrzymałości betonu na ściskanie oraz na wyznaczenie współczynników aktywacji.

3. Analiza wyników

Na wykresach przedstawiono wyniki oznaczeń przyrostu wczesnej wytrzymałości betonów dojrzewających w stałych temperaturach +5°C, +20°C, +35°C wykonanych z cementów A, B, C.

Zastosowanie różnych rodzajów cementów ma decydujący wpływ na przyrost wczesnej wytrzymałości betonu. Największy przyrost wytrzymałości odnotowano dla betonu wykonanego z cementu CEM I 42,5R dojrzewającego w stałej temperaturze +35°C.

Próbki betonowe wykonane z cementów A, B, C podlegały wstępnemu dojrzewaniu przez okres 2, 5, 8 godzin nad wodą w temperaturze +18°C, a następnie zostały jednokrotnie schłodzone do temperatur -3°C, -8°C. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 4. Z analizy badań wynika jednoznacznie, że im krótszy czas wstępnego dojrzewania i niższa temperatura zamrożenia, tym większe spadki wytrzymałości. Widoczna jest ogólna tendencja im mniejsza wytrzymałość w momencie zamrożenia tym większe spadki wytrzymałości betonu na ściskanie.

Największy spadek wytrzymałości zanotowano dla betonu wykonanego z cementu CEM II/B-V 32,5R, który został zamrożony do temperatury -8°C po 2 godzinach wstępnego dojrzewania i wynosi 52,3%. Najmniejszy spadek zaś dla betonu z cementu CEM I 42,5R schłodzonego do temperatury -3°C po 8 godzinach wstępnego dojrzewania – 11,8%.

Uzyskane wyniki badań próbowano opisać za pomocą funkcji dojrzałości podanej przez A.M. Neville'a i Instrukcję ITB nr 282. Stosowanie tych funkcji dla badanych betonów prowadzi do dużych błędów. W rzeczywistości wartości obliczeniowe są dużo większe niż wytrzymałość uzyskana doświadczalnie. Przeszacowanie dla betonów w początkowym okresie dojrzewania może wynosić 100%.

Wykorzystując funkcję dojrzałości podaną przez Hansena i Pedersena, która pozwala określić wytrzymałość betonu na ściskanie w zależności od jego temperatury i czasu dojrzewania, wyznaczono doświadczalnie współczynniki aktywacji E_a dla cementów (tab. 2).

Otrzymane współczynniki aktywacji dla badanych cementów pozwalają dokładnie oszacować wytrzymałość na ściskanie w zależności od temperatury i czasu dojrzewania. Dla cementów portlandzkich norma ASTM C 1074 podaje przedział $E_a = 40-45$ kJ/mol [5]. Dla cementu portlandzkiego z popiołem literatura podaje przedział do 26 kJ/mol.

Zastosowanie różnych cementów ma decydujący wpływ na wielkość zmian objętości młodego betonu jednokrotnie schładzanego przy jednokierunkowej wymianie ciepła. Na wykresach zachodzi widoczna liniowa korelacja między odkształceniami a spadkami wytrzymałości betonu na ściskanie. Wnioskować można, że rodzaj cementu nie ma istotnego wpływu na tę zależność. Parametry te można stosować zamiennie. Zamiast przeprowadzać uciążliwe badanie pomiaru spadków wytrzymałości betonu, możemy pomierzyć odkształcenia.

Potwierdzenie liniowej zależności ma istotne znaczenie dla praktyki, ponieważ wyznaczanie zmian objętości jest mniej pracochłonne i czasochonne niż wyznaczanie spadków wytrzymałości betonu.

4. Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań wynika dość ścisła zależność pomiędzy odkształceniami a spadkami wytrzymałości betonów jednokrotnie zamrożonych. Dokonując pomiaru odkształceń możemy określić spadki wytrzymałości po 28 dniach dojrzewania dla próbek jednokrotnie zamrożonych. Istnieje potrzeba

dalszych badań, aby potwierdzić uzyskane wyniki. Z analizy badań wynika ogólna tendencja, że beton zamrożony po krótszym czasie wstępnego dojrzewania do niższej temperatury wykazuje największe spadki wytrzymałości na ściskanie. Obliczone współczynniki aktywacji pozwalają określić rzeczywistą wytrzymałość na ściskanie w zależności od temperatury i czasu dojrzewania betonu.

Badania opisane w artykule zostało częściowo sfinansowane z dotacji Nr POIG 01.01.02-10-106/09-00.