

JERZY WAWRZEŃCZYK¹
MACIEJ LECH²
Kielce University of Technology
Faculty of Civil Engineering and Architecture
¹ e-mail: zmsjw@tu.kielce.pl
² e-mail: maciejl@tu.kielce.pl

ESTIMATION, BASED ON THE MATURITY FUNCTION, OF THE STRENGTH OF EARLY AGE CONCRETE CURED AT ELEVATED TEMPERATURE

Abstract

In mass production of concrete precast units, it is important to optimise technology which would ensure high early age compressive strength of concrete, and also follow the principles of sustainable manufacturing and reduce costs.

The paper presents the analysis of results obtained for three series of concretes made from CEM I42.5R cement, at the water-cement ratios of 0.34, 0.38, and 0.42, cured at different temperatures, namely 20, 40 and 60 °C, where heating was performed in 16-hour cycle.

The analysis aimed at determining functional properties which allow the estimation of concrete compressive strength depending on the temperature history. The Carino-Lew function was adopted to determine the relation between the curing time and temperature and the equivalent curing time t_e . The determined values of cement thermal sensitivity factor ranged 0.023÷0.040, which was related to the w/c ratio and the strength level. An exponential function was developed to express concrete compressive strength dependence on the equivalent curing time t_e . In the authors' opinion, the function can contribute to the optimisation of the production process of concrete precast units by means of designing the temperature profile, depending on the concrete mix formulation and the assumed level of concrete structural strength.

Keywords: precast concrete, thermal curing, maturity function, compressive strength

1. Introduction

Production of quality concrete elements with the use of sustainable methods and, at the same time, maintaining a high level of productivity and minimizing costs poses a strong challenge to precast unit manufacturers. In prefabrication, one of the major goals is to increase the energy efficiency of the prefabrication plant by minimising or eliminating thermal curing of early age concrete products. Thermal curing generates costs resulting from energy consumption, which in turn is related to harmful CO₂ emissions into the atmosphere, and also negatively affects the durability of concrete elements. Both issues, which are of key importance for efficient and sustainable concrete production, need to be further optimised.

The core of the solution to the problem involves the design of the optimal concrete mix formulation that would ensure a quick increment in early age strength without the necessity of using steam curing (or at least limiting the thermal treatment). A significant reduction in manufacturing costs and increase in productivity can be achieved by shortening the production cycle of precast units.

For decades, various methods have been used to accelerate an increment in early age concrete strength. Those can be classified as follows:

- mechanical -> pressing, vibration,
- chemical -> admixtures, plasticizers, hardening accelerating admixtures,
- thermal -> curing at elevated temperatures.

Most frequently, concrete thermal treatment has been used. In thermal treatment, elevated curing temperatures affect the cement hydration process in two ways:

- the reaction rate increases with an increase in temperature,

- the hydration products formed on the surfaces of cement grains hinder water penetration into such a coating, which slows down the hydration rate and lowers the hydration degree.

In the guidelines on thermal treatment, presently in force, it is assumed that the maximum temperatures used should be considerably lowered, which may produce a positive effect on the quality of the products [1]. The recommended level of the maximum temperature of 60-75 °C for a majority of products (the temperature values differ much from those applied in the 1970s) should not be exceeded. Additionally, a certain increase in temperature resulting from the cement hydration heat needs to be taken into account.

A key issue is to modify the existing manufacturing technologies for precast units in such a manner as to completely eliminate the risk of the occurrence of changes in volume and stresses which cause the formation of defects, including hairline cracks. Goszczyńska et al. [2] indicate that in the production of precast bridge beams, defects in the structure, namely hairline cracks, are formed. Those may partly originate in non-homogeneity of the parameters of the concrete mix and/or non-uniform heating of the precast units. Although not posing any threat to the bearing capacity, that makes it necessary to perform additional injections, discourages buyers and is damaging to the reputation of the manufacturing company.

Since the 1950s, attempts have been made to describe the dependence of strength on curing temperature and duration. The most important functional dependencies are presented in Table 1. The maturity method is one of the basic tools used for predicting the development the compressive strength of concrete. The method involves the determination of the equivalent curing time t_e on the basis of measurements of temperature in the concrete and the concrete curing time. The concept of concrete maturity is related to the Arrhenius function expressed as follows:

$$t_e = \sum \left[\exp \left[-\frac{E_a}{RT} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \right] * \Delta t \quad (1)$$

where: E_a - activation energy

R- gas constant (8.314 J/(mol·°K)),

T, T_0 - absolute temperature of concrete and reference temperature, °K (273+°C),

Δt - time step.

Table 1.

Author	Function type	Strength-age function
Plowman [3]	Logarithmic	$S = a + b \cdot \log(M)$
ASTM C1074 [4]	Linear hyperbolic	$S = S_u \frac{k \cdot t'}{1 + k \cdot t'}$
Knudsen [5]	Parabolic hyperbolic	$S = S_u \frac{\sqrt{k \cdot t'}}{1 + \sqrt{k \cdot t'}}$
Hansen, Pedersen [6]	Exponential	$S = S_u \cdot e^{-\left(\frac{t}{t'}\right)^\alpha}$
CEB-FIB [7]	Exponential	$S = S_7 \cdot e \left[A \cdot \left(1 - \left(\frac{t}{t'} \right)^B \right) \right]$
<p>M=$\Sigma(T-10)$ – maturity (Nurse-Saul function) t' – time after setting k – rate constant, 1/day S_u – ultimate strength S_7 – strength at 7 days age</p>		

The dependence presented above was used for decades to assess the strength of plain concrete structures (usually in the temperature range of 5 – 40 °C) due to the simplicity of the formula and a relatively good correlation between concrete strength and cement hydration. In practice, once the value of E_a is assumed, the dependence f_c-t_e is determined on the basis of the examination of specimens cured only at the reference temperature T_o , equal to, e.g. 20 °C.

The procedure of determining E_a for a given cement with respect to a specific concrete composition (w/c ratio) is described in the ASTM C1074 standard [4], and the example of determination is presented in study [8]. The maturity function contains only one variable, namely E_a , which is termed the activation energy (more properly, it should be called the index of cement hydraulic activity [8]). As cement is considered to be a mixture of different chemical compounds rather than pure homogeneous material, the index E_a can be only treated as relative activation energy. On the basis of numerous analyses of theoretical investigations and experimental data, various, often divergent, conclusions are produced on what values of the index E_a should be selected. The value of E_a depends not only on the type of cement, additives, and chemical admixtures, but also on w/c ratio (traditional concretes and high performance concrete HPC).

Although it has been long debated whether E_a is a parameter that adequately describes the maturity of the hydrating cement, the formula for the determination of equivalent time has been, and still is, widely used both in the construction practice and in modelling physico-mechanical properties of different concretes.

Another, slightly simplified, approach to the determination of the dependence $t_e=f(T, t)$ was presented by Carino and Lew [9] :

$$t_e = \sum_0^t e^{B(T_i-T_o)} \Delta t \quad (2)$$

where:

B- cement thermal sensitivity factor, 1/°C

T- mean concrete temperature in the time interval Δt , °C

T_o - reference temperature, °C.

Instead of the over-theorized index of E_a , which might not always adequately represent the dependence f_c-t_e , the authors propose a simpler approach, where B is the regression coefficient responsible for the best fit of the measurement results to those determined with the function. Both equations produce similar results of computations of the equivalent time t_e .

The issue of the effect of elevated temperature on the strength properties of concrete is relevant for both concrete precast units subjected to thermal treatment, and also massive concretes which become considerably self-heated.

The paper presents an attempt at expressing the compressive strength of concrete as a function of curing time and temperature.

2. Experimental

Three series of concretes having w/c ratios = 0.34, 0.38 and 0.42 were used in the tests.

Concretes were made using CEM I 42.5R cement, natural sand 0-2 mm, basaltic coarse aggregate fraction 4-8mm and 8-16 mm, and HWRA chemical admixture.

The notation for concrete series, depending on w/c ratio and concrete curing temperature T_{max} , are presented in Table 2.

Table 2. Experimental plan

Concrete series	Water-cement ratio w/c	Temperature T_{max} , °C		
		20	40	60
A	0.34	A20	A40	A60
B	0.38	B20	B40	B60
C	0.42	C20	C40	C60

For each concrete series, a large batch was made, from which 45 cubic specimens with a side length of 10 cm were formed. The specimens in the moulds were placed in three chambers and subjected to different heat and steam curing cycles. The diagram of the assumed pattern of changes in temperature is shown in

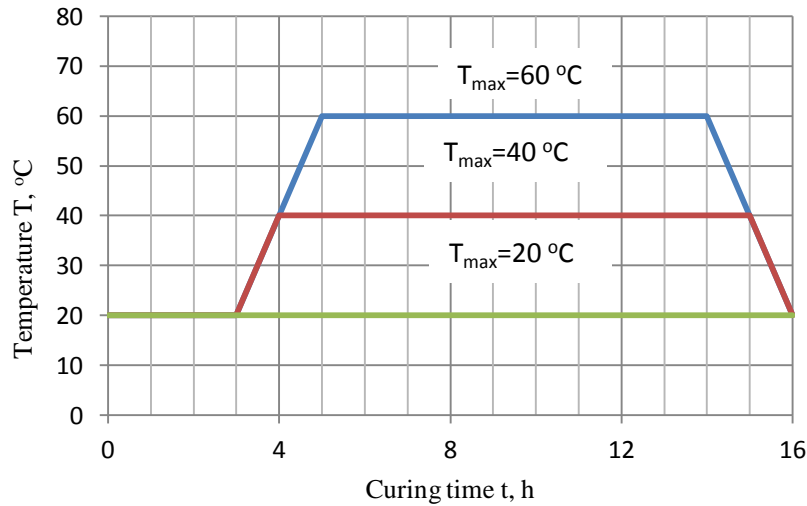


Fig. 1. The duration of the heat curing cycle was 16 hours, additionally, all specimens were cured under air-dry conditions for up to 28 days.

3. Experimental results

3.1. Equivalent time t_e

For each series of concretes, the results of measurements of actual temperature in the specimens were recorded. Exemplary profile of temperature changes in the specimens made from concrete B ($w/c=0.38$) are presented in Fig 2.

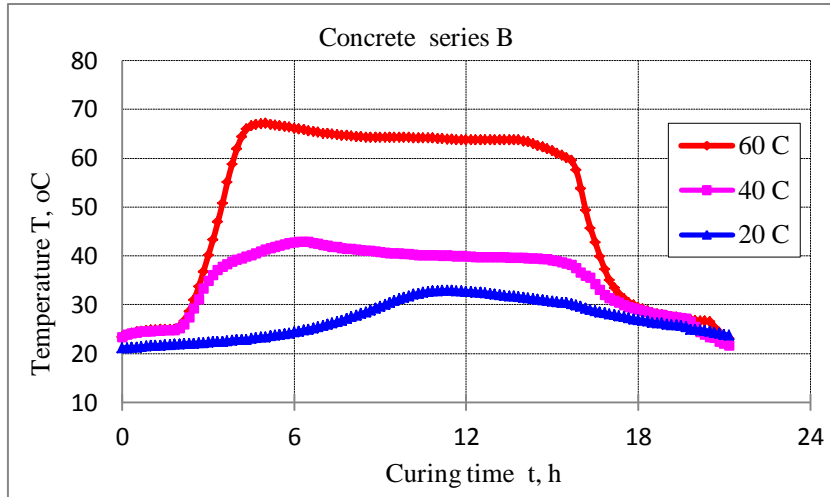


Fig. 2. Results of measurements of the actual temperature in series B concretes cured at different temperatures

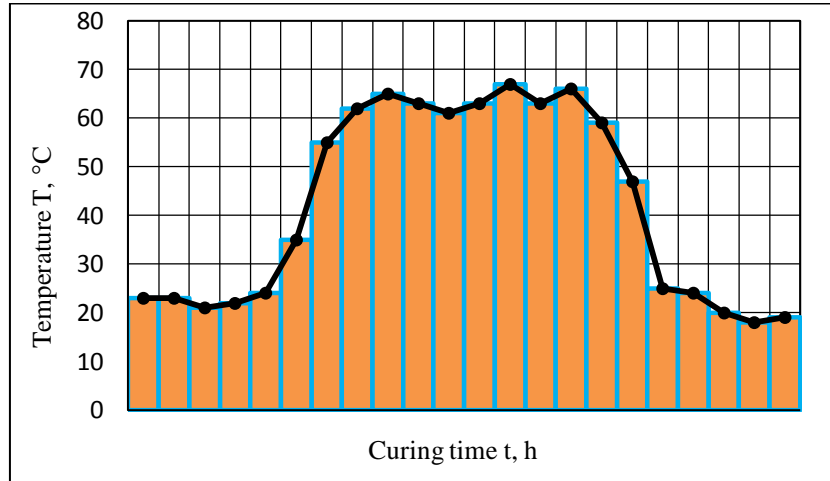


Fig. 3. Schematic of temperature-time factor computed according to Equation 2.

The equivalent curing time was computed taking into account the temperature history. The appropriately modified Carino function was used (2):

$$t_e = \sum_0^t e^{B(T_i - T_0)} \Delta t = \frac{\Delta t}{24 \cdot D} \cdot (\sum_0^t e^{B \cdot T_i}) \quad (3)$$

where the expression / constant amounts to $D = e^{B \cdot T_0}$.

In this form, the function facilitates calculations when Excel spreadsheet is used.

The impact of the factor B on the value of temperature conversion factor $F_i = e[B(T_i - T_0)]$ is shown in Fig. 4. As shown in the plot, the values of the factor B are located in the range 0.02-0.05.

The basis for the determination of the equivalent curing time of concrete was provided by temperature measurements. Those were taken using thermocouples located in the samples, in each of the steaming chambers one sensor was used. Temperatures were recorded at 10-min intervals.

The values of factor B for A, B and C series concretes were determined using VBA macros constructed in the spreadsheet, which is presented, in a more detailed manner, in Section 4.

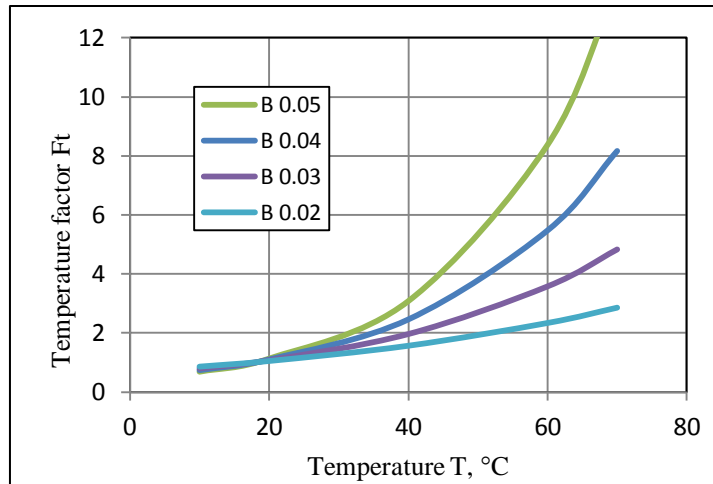


Fig. 4. The influence of concrete temperature and factor B on temperature conversion factor.

3.2. The strength of concrete cured at different temperatures

The compressive strength of concrete was determined after 16 hours, 1, 3, 7, 14 and 28 days of curing. The results of concrete strength determination are presented in Figs 5÷7, (for concrete C60, it was impossible to carry out the steam curing cycle because of the failure of the chamber heating system).

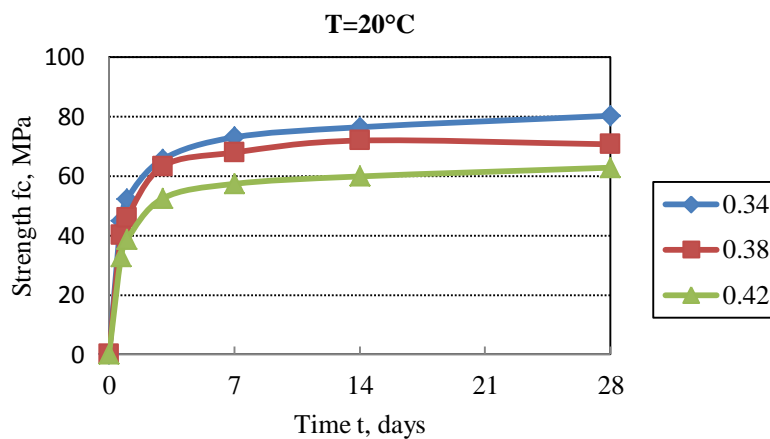


Fig. 5. Strength evolution of concretes carried at temperature $T=20^{\circ}\text{C}$.

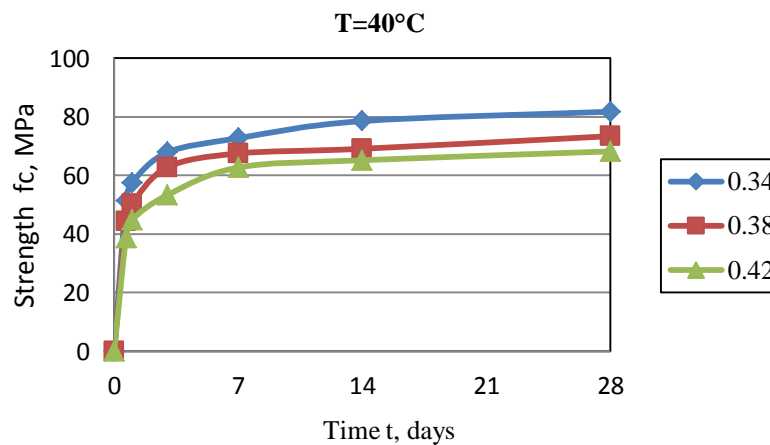


Fig. 6. Strength evolution of concretes carried at temperature $T=40^{\circ}\text{C}$.

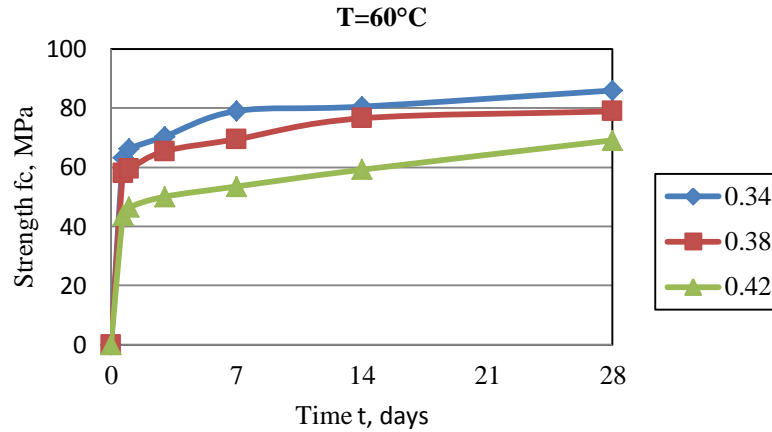


Fig. 7. Strength evolution of concretes cured at temperature T=60°C.

4. Analysis of experimental results

The analysis of experimental results was intended to determine factors B, a and b, which would make it possible to compute the equivalent curing time, followed by the estimation of the compressive strength depending on time and temperature history for concrete subjected to thermal treatment.

The computations were performed using Excel spreadsheet. For each concrete series, namely A, B and C, separate spreadsheets were created, in which the results of temperature measurements were compiled. The equivalent curing time was calculated in accordance with Equation (2) using appropriately constructed VBA macros. Having assumed, at the beginning, the values of the factor B, the equivalent curing time corresponding to 16 hours, 1,3 and 7 days of curing at the temperature of 20°C was computed. The comparison of the computed equivalent times with the curing times at the temperature of 20°C are presented in Fig. 8.

A successive spreadsheet shows the results arranged separately for each concrete series (having a specific w/c ratio), those refer to computed equivalent curing times and compressive strengths. The dependence holding between strength and time was assumed to be expressed by the following function:

$$f_{cm} = a + b/\sqrt{te} \quad (4)$$

The trial and error method was employed to select the values of factors B, separately for each concrete series, in such a manner, so that in the figure, the plots of the function were positioned as close as possible. The determined values of factors B are shown in Table 3. The analysis indicates the value of B is not constant, and it depends on the w/c ratio (concrete strength level).

Table 3. Values of factor B

Concrete series	W/C ratio	factor B
A	0,34	0,040
B	0,38	0,030
C	0,42	0,023

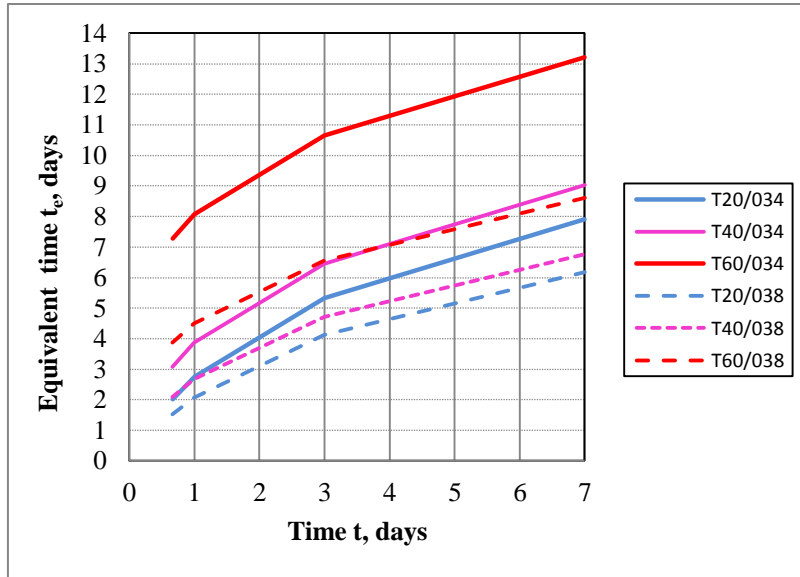


Fig. 8. Equivalent curing times and compressive strength.

Fig. 7 shows the dependence of strength f_{cm} on the curing time t_e , expressed by the function:

$$\ln(f_{cm}) = a + b/\sqrt{te} \quad (5)$$

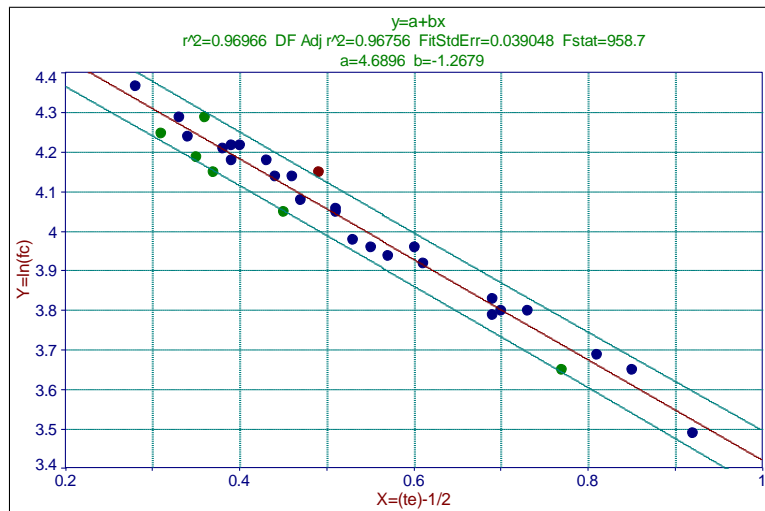


Fig. 9. Dependence of strength f_{cm} on the curing time t_e , expressed by the function
 In the plot, the following are marked: measurement results, the lines indicating 90% confidence interval, and the determined regression coefficients ($a=4.69$ and $b=-1.268$). On the basis of the above, it can be stated that the result scatter is not too large with respect to the determined regression function. In Fig. 10, the function described above is shown in the exponential form, also the strength values obtained in the experiment are given.

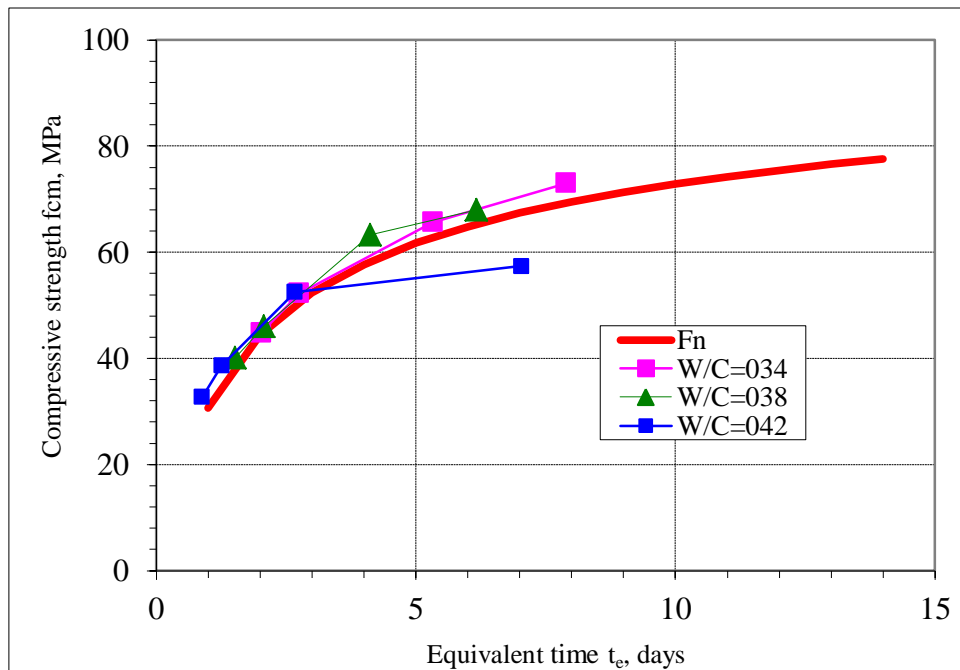


Fig. 10. The Exponential function and strength of the results obtained in the experiment.

The function makes it possible to estimate the compressive strength of concrete depending on the equivalent curing time t_e , determined from the measurements of the actual temperature of concrete cured under different thermal conditions.

The dependence can be employed, among others, for the optimization of the steam curing process, when designing the profile of temperature changes and assuming a certain level of concrete compressive strength that is to be achieved at the end of the manufacturing process.

The results presented in the publication were obtained during research funded within the framework of the project "RIS Perspectives Świętokrzyskie - IV stage of" No: WND - POKL.08.02.02 - 26 - 001/12 - Human Capital Operational Programme, Priority VIII, Measure 8.2 Transfer of knowledge, Sub-measure 8.2.2 Regional Innovation Strategies.

References

1. Włodarczyk M.: Projektowanie energooszczędnych procesów obróbki cieplnej betonu (Design of energy saving processes for thermal treatment of concrete). XVI Konferencja Naukowo-Techniczna JADWISIN'98, Serock 1998, pp. 125-132 (in polish).
2. Goszczyńska B., Świt G., Trąpczyński W., Krampikowska A.: Application of the acoustic emission (AE) method to bridge testing and diagnostics comparison of procedures. IEEE Xplore - IEEE Proceedings, 2012, pp. 1-10.
3. Plowman J.M.: Maturity and the strength of concrete. Magazine of Concrete Research, 1956, Vol. 8, No. 22, March, pp. 13-22.
4. ASTM C 1074-04, Standard practice for estimating concrete strength by the maturity method. ASTM Standards Vol. 04.02, ASTM, West Conshohocken, PA.
5. Knudsen T.: The dispersion model for hydration of Portland cement: I. General concepts. Cement and Concrete Research, 1984, Vol. 14., pp. 622-630.
6. Hansen F.P., Pedersen J.: Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete. Nordisk Betong, 1977, No. 1, pp. 19-34.
7. CEN-FIB Model Code 1990.
8. Wawrzeńczyk J., Kotwa A.: The possibility of estimation of concrete compressive strength based on the maturity function. CWB, 2013, pp. 145-149.
9. Tank R.C., Carino N.J.: Rate constant functions for strength development of concrete. ACI Journal, 1991, Vol. 88, No. 1, Jan-Feb, pp. 74-83.

JERZY WAWRZEŃCZYK¹
MACIEJ LECH²
Kielce University of Technology
Faculty of Civil Engineering and Architecture
¹ e-mail: zmsjw@tu.kielce.pl
² e-mail: maciejl@tu.kielce.pl

SZACOWANIE WCZESNEJ WYTRZYMAŁOŚCI BETONU DOJRZEWAJĄCEGO W PODWYŻSZONEJ TEMPERATURZE NA PODSTAWIE FUNCJI DOJRZAŁOŚCI

Streszczenie

Istotnym zagadnieniem w intensywnej produkcji prefabrykatów betonowych jest optymalizacja technologii pozwalającej na uzyskanie wysokiej wytrzymałości wczesnej betonu przy zachowaniu zasad zrównoważonego wytwarzania oraz minimalizacji kosztów.

W artykule przedstawiono analizę wyników uzyskanych dla trzech serii betonów wykonanych z cementem CEM I42,5R, o stosunku wodno-cementowym 0,34, 0,38, 0,42, dojrzewających w różnych temperaturach 20, 40 i 60 °C, gdzie podgrzewanie realizowano w cyklu 16-godzinnym.

Celem analizy było wyznaczenie zależności funkcyjnych pozwalających na szacowanie wytrzymałości betonu na ściskanie w zależności od historii zmian temperatury. Przyjęto funkcję Carino-Lew do wyznaczenia zależności pomiędzy czasem i temperaturą dojrzewania a ekwiwalentnym czasem dojrzewania t_e . Wyznaczone wartości współczynnika czułości termicznej cementu mieściły się w zakresie $0,023 \div 0,040$, co związane jest ze stosunkiem W/C i poziomem wytrzymałości. Opracowano funkcję eksponentialną opisującą zależność wytrzymałości betonu na ściskanie od czasu ekwiwalentnego dojrzewania t_e . Zdaniem autorów może ona stanowić podstawę do optymalizacji procesu produkcji prefabrykatu betonowego poprzez projektowanie przebiegu zmian temperatury zależnie od składu oraz zakładanego poziomu wytrzymałości technologicznej betonu.

1. Wprowadzenie

Dużym wyzwaniem dla producentów prefabrykatów jest możliwość produkcji wysokiej jakości elementów betonowych za pomocą zrównoważonych metod przy zachowaniu wysokiej produktywności i minimalizacji kosztów. Jednym z głównych celów w prefabrykacji jest zwiększenie wydajności energetycznej zakładów prefabrykacji poprzez zminimalizowanie lub wyeliminowanie pielęgnacji cieplnej świeżych wyrobów betonowych. Ma ona bowiem nie tylko negatywny wpływ na koszty zużycia energii, które wiąże się jednocześnie z niekorzystną emisją CO₂ do atmosfery, lecz również na trwałość betonowych elementów. Obydwie kwestie odgrywają ważną rolę w wydajnej, zrównoważonej produkcji betonu i wymagają dalszej optymalizacji.

Istota rozwiązania takiego problemu polega na opracowaniu zoptymalizowanego składu betonu pozwalającego na szybki przyrost wczesnej wytrzymałości bez konieczności stosowania naporzania (lub przynajmniej ograniczając termoobróbkę). Znaczną optymalizację kosztów wytwarzania oraz wzrost produktywności wykonawców elementów prefabrykowanych możliwy jest poprzez skrócenie cyklu produkcji prefabrykatów.

Od dziesiątków lat przyspieszenie przyrostu wczesnej wytrzymałości betonu uzyskiwane jest poprzez zastosowanie różnych metod:

- mechanicznych -> prasowanie, wibrowanie,
- chemicznych -> dodatki, domieszki plastyfikujące, przyspieszające twardnienie,
- termicznych -> dojrzewanie w podwyższonych temperaturach.

Najczęściej stosowana była obróbka cieplna, w której podniesienie temperatury dojrzewania wpływa na kinetykę procesów hydratacji cementu dwojako:

- szybkość reakcji wzrasta wraz ze wzrostem temperatury,

- produkty hydratacji powstające na powierzchni ziarn cementu utrudniają penetrację wody poprzez taką powłokę co spowalnia dalsze tempo hydratacji oraz obniża stopień hydratacji.

Obecnie obowiązujące zalecenia dotyczące realizacji procesu obróbki cieplnej zakładają znaczne obniżenie stosowanych temperatur maksymalnych, co może korzystnie wpłynąć na jakość wyrobów [1]. Zalecany poziom temperatury maksymalnej 60-75 °C dla większości wyrobów (znacznie odbiegają od wartości zalecanych w latach 70-tych) nie powinien być przekraczany biorąc pod uwagę pewien wzrost temperatury w wyniku wydzielanego ciepła hydratacji cementu.

Kluczową kwestią jest tu zmodyfikowanie istniejących technologii wytwarzania elementów prefabrykowanych, które całkowicie wyeliminowałoby ryzyko wystąpienia zmian objętościowych i naprężeń powodujących powstawanie defektów w postaci rys. Goszczyńska i inni [2] stwierdzili, że w procesie produkcji prefabrykowanych belek mostowych powstają defekty struktury w postaci rys. Częściowo mogą one wynikać z niejednorodności parametrów mieszanki betonowej oraz/lub nierównomiernego nagrzewu prefabrykatów. Występowanie takich defektów, chociaż nie zagraża nośności prefabrykatów, budzi zastrzeżenia kupujących, wymaga dodatkowych iniekcji a ponadto obniża wizerunek producenta na rynku.

Od lat 50-tych podejmowano próby opisanie zależności wytrzymałości od temperatury i czasu dojrzewania. Najważniejsze zależności funkcyjne przedstawiono w tabeli 1. Jedną z podstawowych metod stosowanych do prognozowania rozwoju wytrzymałości betonu na ściskanie jest metoda „dojrzałości” polegająca na wyznaczaniu ekwiwalentnego czasu dojrzewania t_e na podstawie pomiarów temperatury w betonie i czasu jego dojrzewania. Koncepcja dojrzałości betonu nawiązuje do funkcji Arrheniusa przedstawionej w postaci wzoru (1)

Zależność taką stosowano przez dekady do oceny wytrzymałości konstrukcji z betonu zwykłego (zazwyczaj w temperaturach w zakresie 5 – 40 °C) ze względu na jej prostotę oraz stosunkowo dobrą korelację wytrzymałości betonu z hydratacją cementu. W praktyce, po przyjęciu wartości E_a , zależność f_c-t_e jest określona na podstawie badania próbek dojrzewających tylko w temperaturze odniesienia T_0 równej np. 20 °C.

Procedura wyznaczania E_a dla danego cementu w odniesieniu do określonego składu betonu (stosunek W/C) opisana jest w normie ASTM C1074 [4], a przykład wyznaczania przedstawiono w pracy [8]. Funkcja dojrzałości zawiera tylko jedną zmienną E_a nazywaną energią aktywacji (poprawniej należałoby nazywać współczynnikiem aktywności hydraulicznej cementu [8]). Ponieważ cement należy traktować jako mieszaninę różnych związków chemicznych a nie jako czysty jednorodny materiał, to współczynnik E_a może być tylko traktowany jako względna energia aktywacji. Na podstawie licznych analiz wyników badań teoretycznych i danych eksperymentalnych przedstawiane są różne i często rozbieżne wnioski dotyczące przyjmowania wartości współczynnika E_a . Wartość E_a zależna jest nie tylko od rodzaju cementu, dodatków, domieszek chemicznych ale również od stosunku W/C (betony tradycyjne i HPC).

Pomimo debaty na temat czy E_a jest parametrem adekwatnie opisującym dojrzałość hydratyującego cementu, formuła wyznaczania czasu ekwiwalentnego była i jest szeroko stosowana zarówno w praktyce budowlanej jak i w modelowaniu właściwości fizyko-mechanicznych różnych betonów.

Inne nieco uproszczone podejście do wyznaczania zależności $t_e=f(T, t)$ przedstawił Carino i Lew [9] Zamiast wydumanego współczynnika E_a , który nie zawsze najlepiej odzwierciedla zależności f_c-t_e , autorzy proponują podejście prostsze, gdzie B jest współczynnikiem regresji odpowiadający za najlepsze dopasowanie wyników pomiarów i wyników wyznaczanych za pomocą funkcji. Oba równania dają podobne wyniki obliczeń ekwiwalentnego czasu t_e .

Zagadnienie wpływu podwyższonej temperatury na właściwości wytrzymałościowe betonu jest istotne zarówno w przypadku prefabrykatów betonowych poddawanych obróbce termicznej jak i betonów masywnych ulegającym znacznemu samoociepleniu.

W referacie przedstawiono próbę opisaną zależności wytrzymałości na ściskanie betonu w funkcji czasu i temperatury dojrzewania.

2. Opis badań

Przedmiotem badań były trzy serie betonów o stosunku wodno-cementowym $W/C=0,34, 0,38$ i $0,42$. Betony wykonano z cementem CEM I 42,5R, natural sand 0-2 mm, basaltic coarse aggregate fraction 4-8mm and 8-16 mm and HWRA chemical admixture.

Oznaczenie serii betonu w zależności od stosunku W/C i temperatury dojrzewania betonu T_{max} zamieszczono w tabeli 2.

Dla każdej serii betonu wykonano duży zarób i zaformowano 45 próbek-kostek o boku 10 cm. Próbki razem z formami umieszczano w trzech komorach, w których realizowano różne cykle podgrzewania i naparzania betonu. Schemat zakładanego przebiegu zmian temperatury pokazano na rysunku 1.

Długość cyklu podgrzewania wynosił 16 godzin, po czym wszystkie próbki dojrzewały w warunkach powietrzno-suchych w okresie do 28 dni.

3. Wyniki badań

3.1. Ekwiwalentny czas t_e

Dla każdej serii betonów zarejestrowano wyniki pomiarów rzeczywistej temperatury w badanych próbkach. Przykładowy przebieg zmian temperatury w próbkach betonu B ($W/C=0,38$) przedstawiono na rysunku 2.

Czas ekwiwalentnego dojrzewania wyliczono biorąc pod uwagę historię zmiany temperatury. Zastosowano odpowiednio zmodyfikowaną funkcję Carino (2):

Funkcja w tej postaci umożliwia łatwe obliczenia stosując arkusz programu Excela.

Wpływ współczynnika B na wartość conversion temperature factor $F_t=e[B(T_f-T_o)]$ przedstawiono na rysunku 3. Jak wynika z wykresu wartości współczynnika B mieszczą się w zakresie 0,02-0,05.

Podstawą do wyznaczenia czasu ekwiwalentnego dojrzewania betonu były pomiary temperatury, które oznaczano za pomocą termopar umieszczonych w próbkach- po jednym czujniku w każdej z komór naparzalniczych. Temperatury rejestrowano w odstępach 10-cio minutowych.

Wartości współczynnika B dla betonów serii A, B i C wyznaczono wykorzystując makra VBA przygotowane w arkuszu kalkulacyjnym, co przedstawiono bliżej w rozdziale 4.

3.2. Wytrzymałość betonu dojrzewającego w różnych temperaturach

Wytrzymałość betonu na ściskanie oznaczano po 16 godzinach, 1, 3, 7, 14 i 28 dniach dojrzewania. Wyniki oznaczeń wytrzymałości betonu przedstawiono na rysunkach 3÷5. (W przypadku betonu C60 nie udało się zrealizować cyklu naparzania ze względu na awarię układu grzewczego w komorze).

4. Analiza wyników badań

Analiza wyników badań miała na celu wyznaczenie współczynników B, a i b, które pozwalałyby na obliczanie ekwiwalentnego czasu dojrzewania a następnie szacowanie wytrzymałości na ściskanie w zależności od czasu i historii zmian temperatury betonu poddanego obróbce termicznej.

Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem arkusza kalkulacyjnego Excel. Dla każdej serii betonu A, B i C przygotowano oddzielne arkusze, w których zestawiono wyniki pomiarów temperatury. Ekwiwalentny czas dojrzewania obliczano wg wzoru (2) wykorzystując w tym celu odpowiednio przygotowane makra VBA. Zakładając na wstępie wartości współczynnika B wyliczono ekwiwalentny czas dojrzewania odpowiadający 16 godzinom, 1,3 i 7 dniom dojrzewania w temperaturze 20°C. Porównanie obliczonych czasom ekwiwalentnym w stosunku do czasu dojrzewania w temperaturze 20°C przedstawiono na rysunku 6.

Na kolejnym arkuszu zestawiono wyniki, pogrupowane oddzielnie dla każdej serii betonu (o danym stosunku W/C), obejmujące wyznaczone ekwiwalentne czasy dojrzewania oraz wytrzymałości na ściskanie. Zależność pomiędzy wytrzymałością a czasem t_e przyjęto w postaci funkcji (3)

Metodą „prób i błędów” dobierano wartość współczynników B oddzielnie dla każdej serii betonów w taki sposób, aby na rysunku uzyskać najbliższe położenie wykresów funkcji. Wyznaczone wartości współczynników B zestawiono w tabeli 3. Z analizy wynika, że wartość B nie jest stała i zależy od stosunku W/C (poziomu wytrzymałości betonu).

Na wykresie 9 przedstawiono zależność wytrzymałości f_{cm} od czasu dojrzewania t_e wyrażonej w postaci funkcji (4)

Na wykresie naniesiono wyniki pomiarów z zaznaczeniem linii odpowiadającym 90% ufności oraz wyznaczone współczynniki regresji ($a=4,69$ i $b=-1,268$). Na tej podstawie można stwierdzić, że rozrzut wyników nie jest zbyt duży w stosunku do wyznaczonej funkcja regresji. Natomiast na rysunku 10 przedstawiono opisaną wyżej funkcję w postaci eksponentyjnej oraz wyniki wytrzymałości uzyskane w eksperymencie.

Funkcja ta umożliwia szacowanie wytrzymałości betonu na ściskanie w zależności od czasu ekwiwalentnego dojrzewania t_e , wyznaczonego na podstawie pomiarów rzeczywistej temperatury betonu dojrzewającego w różnych warunkach termicznych.

Zależność ta może być wykorzystana między innymi do optymalizacji procesu naporzania projektując przebieg zmiany temperatury oraz przyjmując pewien poziom wytrzymałości betonu, jaki ma być uzyskany na końcu procesu produkcyjnego.

Wyniki przedstawione w publikacji zostały uzyskane w trakcie badań sfinansowanych w ramach Projektu "Perspektywy RSI Świętokrzyskie – IV etap" nr: WND – POKL.08.02.02 – 26 – 001/12 - Program Operacyjny Kapitał Ludzki, Priorytet VIII, Działanie 8.2 Transfer wiedzy, Poddziałanie 8.2.2 Regionalne Strategie Innowacji.

References

10. Włodarczyk M.: Projektowanie energooszczędnych procesów obróbki cieplnej betonu (Design of energy saving processes for thermal treatment of concrete). XVI Konferencja Naukowo-Techniczna JADWISIN'98, Serock 1998, pp. 125-132 (in polish).
11. Goszczyńska B., Świt G., Trąpczyński W., Krampikowska A.: Application of the acoustic emission (AE) method to bridge testing and diagnostics comparison of procedures. IEEE Xplore - IEEE Proceedings, 2012, pp. 1-10.
12. Plowman J.M.: Maturity and the strength of concrete. Magazine of Concrete Research, 1956, Vol. 8, No. 22, March, pp. 13-22.
13. ASTM C 1074-04, Standard practice for estimating concrete strength by the maturity method. ASTM Standards Vol. 04.02, ASTM, West Conshohocken, PA.
14. Knudsen T.: The dispersion model for hydration of Portland cement: I. General concepts. Cement and Concrete Research, 1984, Vol. 14., pp. 622-630.
15. Hansen F.P., Pedersen J.: Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete. Nordisk Betong, 1977, No. 1, pp. 19-34.
16. CEN-FIB Model Code 1990.
17. Wawrzeńczyk J., Kotwa A.: The possibility of estimation of concrete compressive strength based on the maturity function. CWB, 2013, pp. 145-149.
18. Tank R.C., Carino N.J.: Rate constant functions for strength development of concrete. ACI Journal, 1991, Vol. 88, No. 1, Jan-Feb, pp. 74-83.