

dr inż. Jacek Zychowicz^{1*)}

ORCID: 0000-0002-2153-0081

mgr inż. Patryk Peraj²⁾

dr inż. Anna Jancy¹⁾

ORCID: 0009-0006-5533-9855

Influence of selected curing conditions on the strength properties of concretes in massive structures

Wpływ wybranych warunków dojrzewania na właściwości wytrzymałościowe betonów w konstrukcjach masowych

DOI: 10.15199/33.2025.06.02

Abstract. The article presents a discussion of the influence of temperature and moisture of low heat of hydration concretes on their strength properties. The results of temperature measurements in an actual foundation slab of a high-rise building constructed in Poland are presented. On the basis of these measurements, laboratory tests of samples matured in similar conditions were planned and carried out. The results of experimental tests, compressive strength and splitting tensile strength of 48 cubic concrete specimens matured in different temperature and moisture conditions are presented and described.

Keywords: massive structures; foundation slab; low-carbon concrete; concrete testing; curing temperature.

Massive structures are made using a large volume of concrete and of significant dimensions. It is assumed that such structures have a thickness or cross-sectional dimension of over 50 cm. A more precise classification is introduced by referring to the surface modulus value m_p , expressed as the ratio of the surface area of the element S to its volume V . A massive structure is one for which $m_p < 2 \text{ m}^{-1}$ and the value of the self-heating temperature of concrete is $T > 20^\circ\text{C}$ [1]. Reinforced concrete or lightly reinforced elements are designed as massive structures and are used in hydrotechnical construction, as well as foundation slabs made in building construction, industry and in infrastructure structures.

A technological and design challenge in the construction of massive concrete structures is the high heat temperature of cement hydration. In large-volume structures, significant heating of the concrete mixture and young concrete occurs during the setting process due to the reaction of cement with water. This can lead to internal thermal stresses exceeding the tensile strength of concrete and, as a result, to the formation of shrinkage cracks. When designing massive foundation slabs for high-rise buildings, a maximum temperature gradient is specified, i.e. the maximum allowable temperature difference within the element. This prevents the formation of internal stresses due to the heating and cooling of the massive element at different

Streszczenie. W artykule omówiono wpływ temperatury i wilgotności betonów o małym cieple hydratacji na ich właściwości wytrzymałościowe. Przedstawiono wyniki pomiarów temperatury w rzeczywistej płycie fundamentowej budynku wysokościowego wykonanego w Polsce. Na podstawie tych pomiarów zaplanowano i wykonano badania laboratoryjne próbek dojrzewających w zbliżonych warunkach. Przedstawiono i opisano wyniki badań doświadczalnych wytrzymałości na ściskanie oraz wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, 48 próbek sześciennych betonu dojrzewających w różnych warunkach temperaturowo-wilgotnościowych.

Słowa kluczowe: konstrukcje masowe; płyta fundamentowa; beton niskoemisyjny; badania betonu; temperatura dojrzewania.

Konstrukcje masowe wykonywane są z wykorzystaniem dużej objętości betonu i o znacznych wymiarach. Przyjmuje się, że konstrukcje takie mają grubość lub wymiar przekroju powyżej 50 cm. Bardziej precyzyjną klasyfikację wprowadza odniesienie się do wartości modułu powierzchniowego m_p , wyrażonego jako stosunek pola powierzchni elementu S do jego objętości V . Konstrukcja masowa to taka, w przypadku której $m_p < 2 \text{ m}^{-1}$ oraz wartość temperatury samoociepnięcia betonu wynosi $T > 20^\circ\text{C}$ [1]. Jako masowe projektowane są elementy żelbetowe lub słabo zbrojone stosowane w budownictwie hydrotechnicznym, a także płyty fundamentowe wykonywane w budownictwie kubaturowym, przemysłowym oraz w obiektach infrastrukturalnych.

Wyzwaniem technologicznym i projektowym przy wykonywaniu betonowych konstrukcji masowych jest wysoka temperatura ciepła hydratacji cementu. W konstrukcjach o dużej objętości dochodzi podczas procesu wiązania do znacznego nagrzewania mieszanki betonowej oraz młodego betonu wskutek reakcji cementu z wodą. Może to prowadzić do wewnętrznych naprężeń termicznych przekraczających wytrzymałość betonu na rozciąganie i w efekcie powstania rys skurczowych. Projektując masowe płyty fundamentowe budynków wysokich, specyfikuje się maksymalny gradient temperatury, czyli maksymalną dozwoloną różnicę temperatury w obrębie elementu. Zapobiega to powstawaniu naprężeń wewnętrznych na skutek nagrzewania się i chłodzenia elementu masowego w różnym tempie. To zjawisko powoduje również powstanie zarysowania, szczególnie

¹⁾ Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji,

²⁾ Adamietz Sp. z o.o.

^{*)} Correspondence address: jacek.zychowicz@wat.edu.pl

rates. This phenomenon also causes cracking, especially in the transition zone between the cold surface and the heated interior of the element.

In order to reduce the hydration heat of concrete in foundation slabs, various solutions are used related to the modification of the composition of the concrete mix, including the use of cements with a low heat of hydration (e.g. CEM III blast furnace cement or CEM V multicomponent cement) and fly ash or microsilica additives, the water-cement ratio is reduced and aggregate fractions of up to 31.5 mm are used to strengthen the aggregate gradation, reduce shrinkage and increase the heat capacity of concrete, while ensuring the possibility of pouring the concrete to the formwork with a pump. Additionally, by reducing the amount of cement in the mixes, the carbon footprint of concrete can be reduced, creating so-called low-carbon concretes. To reduce the heat of hydration, admixtures are also used to slow down the onset of concrete setting time to minimize the temperature gradient, reduce the heat of hydration and enable correct concreting. Delaying the onset of setting time is essential when concreting large-area elements, as it ensures that the layers of the concrete mix can connect before setting begins. When reducing the value of the heat of hydration of concrete, execution aspects such as careful vibration of the mix and appropriate moisture maintenance (e.g. moisturizing, usage of foil, membrane) are also important. In the case of concreting massive elements, a so-called concreting plan is developed, which aims to appropriately divide the element into concreting pours depending on the constraints of the elements and determine the order of concreting individual plots. Test concreting is also performed to determine the change in the temperature of the mixture over time in the case of individual locations of the cross-section of the element. It is also possible to design cooling systems. However, the use of such solutions should be preceded by simulations of concrete cooling in order to avoid introducing additional stresses into massive elements.

The process of concrete curing and maintenance should be described in a concreting quality assurance program. Such a program should include all procedures, requirements and activities necessary to obtain and maintain the appropriate quality of concrete, especially in the context of the risk associated with its large volume (e.g. thermal cracking). It is particularly important to prevent concrete from drying out in the initial setting phase. Water is necessary for the cement hydration process and if it evaporates too quickly, the reactions do not take place in full and the concrete structure is weakened. Excessive water loss leads to impaired setting, which reduces the concrete's strength in both compression and tension. Over-dried concrete can quickly undergo shrinkage deformations, causing micro-cracks on the surface and inside the concrete cross-section in massive structures.

Traditional methods of concrete curing by spraying with water, especially on hot days, using protective foils or wet mats, or using curing products that limit evaporation (e.g. vapour barrier membranes) only bring water to the surface of the elements or reduce its surface evaporation. In massive concretes of considerable thickness, water only sprays the surface of the

w strefie przejściowej między powierzchnią chłodną a rozgrzanym wnętrzem elementu.

W celu zmniejszenia ciepła hydratacji betonu w płytach fundamentowych stosuje się różne rozwiązania związane z modyfikacją składu mieszanki betonowej, m.in. wykorzystuje się cementy o małym cieple hydratacji (np. cement hutniczy CEM III lub cement wieloskładnikowy CEM V) oraz dodatki popiołu lotnego lub mikrokrzemionki, zmniejsza się wskaźnik wodno-cementowy i stosuje kruszywo frakcji do 31,5 mm, aby wzmocnić stos okruszowy, zredukować skurcz oraz zwiększyć pojemność cieplną betonu, zapewniając jednocześnie możliwość podania betonu do szalunku pompą. Dodatkowo, redukując ilość cementu w mieszankach, można obniżyć ślad węglowy betonu, tworząc tzw. betony niskiemisyjne. Do zmniejszenia ciepła hydratacji wykorzystuje się również domieszki spowalniające początek czasu wiązania betonu, aby zminimalizować gradient temperatury, obniżyć ciepło hydratacji i umożliwić poprawne przeprowadzenie betonowania. Opóźnienie początku czasu wiązania ma zasadnicze znaczenie przy betonowaniu elementów o dużej powierzchni, ponieważ zapewnia możliwość połączenia się warstw mieszanki betonowej przed rozpoczęciem wiązania. Przy zmniejszaniu wartości ciepła hydratacji betonu ważne są również aspekty wykonawcze, takie jak staranne wibrowanie mieszanki i odpowiednia pielęgnacja wilgotnościowa (np. nawilżanie, stosowanie folii, membrany).

W przypadku betonowania elementów masowych opracowuje się tzw. projekt betonowania, który ma na celu odpowiedni podział elementu na działki robocze w zależności od skrzepowania elementów i określenie kolejności betonowania poszczególnych działek. Wykonuje się również betonowania próbne, aby określić zmianę temperatury mieszanki w czasie w przypadku poszczególnych miejsc przekroju poprzecznego elementu. Możliwe jest również projektowanie systemów chłodzenia. Zastosowanie takich rozwiązań powinno być jednak poprzedzone symulacjami studzenia betonu, aby nie wprowadzić dodatkowych naprężeń do elementów masowych.

Proces dojrzewania i pielęgnacji betonu należy opisać w programie zapewnienia jakości betonowania. Program taki powinien zawierać wszystkie procedury, wymagania i działania niezbędne do uzyskania i utrzymania odpowiedniej jakości betonu, szczególnie w kontekście ryzyka związanego z jego dużą objętością (np. pęknięcia termiczne). Szczególnie istotne jest zapobieganie przesuszaniu betonu w początkowej fazie wiązania. Woda jest niezbędna do procesu hydratacji cementu i jeśli odparuje zbyt szybko, to reakcje nie zachodzą w pełni, a struktura betonu zostaje osłabiona. Nadmierna utrata wody prowadzi do zaburzenia wiązania, dzięki czemu zmniejsza się wytrzymałość betonu zarówno na ściskanie, jak i rozciąganie. Przesuszony beton może szybko ulegać odkształceniom skurczowym, powodującym mikropęknięcia na powierzchni i wewnątrz przekroju betonu w konstrukcjach masowych.

Tradycyjne sposoby pielęgnacji betonu przez zraszanie wodą, szczególnie w upalne dni, stosowanie folii ochronnych lub mat wilgotnych, czy stosowanie preparatów pielęgnacyjnych ograniczających parowanie (np. membrany paroszczelne)

element and does not reach the interior of the cross-section. As a result, the temperature inside the cross-section does not decrease, and the use of cold water spray only cools the surface and may be an undesirable process. At the same time, with a significant reduction in the water-cement ratio, the amount of mixing water in the composition of the concrete mix may be insufficient for its proper binding.

Annually, over 14 billion m³ of concrete is produced worldwide, making it the second most commonly used construction material after water [2]. It is estimated that 5–15% (0.7–2.1 billion m³ per year) of globally produced concrete is used to produce massive elements, which is why analyses of the behavior of massive concrete are the subject of research by many researchers.

Kiernożycki [3] developed equations defining the theoretical hardening temperature of concrete in massive structures, using Fourier's differential equations. Klemczak [1] analyzed and described in detail the distribution of thermal-shrinkage stresses in the cross-sections of massive slabs. She also focused on the influence of hardening on the change in the stress distribution. Jaromska and Zych [4] analyzed and parameterized the influence of various risks, both design and construction risks, on the level of cracking of foundation slabs. Żmij [5] conducted an analysis of the distribution of thermal-shrinkage strains in massive slabs on piles, in which she also estimated the influence of the confinement of supports. Klemczak and Knoppik-Wróbel [6] analyzed the influence of the conditions of work on the risk of early thermal-shrinkage cracks in massive foundations. Minch [7] developed a comparative table of the cross-sectional area used in the real-built project in relation to his own verification calculations and code requirements, based on the actual failure of the foundation slab in the form of excessive shrinkage cracking.

The mentioned references do not address the issue of actual measurements of the curing temperature of low-carbon concrete in the real-built foundation slabs of high-rise buildings. Therefore, in this article we will present the results of temperature tests in the actual foundation slab of a high-rise building constructed in Poland. Based on the obtained measurement values, a program of humidity and temperature conditions was developed for concrete samples prepared for laboratory tests. The prepared samples used concrete mix recipes similar to those used in the buildings in question. The article also presents the results of experimental tests of compressive strength and tensile strength at splitting of 48 cubic samples of concrete with dimensions of 10×10×10 cm according to PN-EN 12390-1: 2021-12 [8], curing in different temperature and humidity conditions. According to the standard PN-B-06265: 2022-08 [9], which is the Polish supplement to the European standard PN-EN 206+A2: 2021-08 [10], adapting its provisions to national conditions and requirements, in order to determine the compressive strength on samples with an edge length of 100 mm, the result should be converted to samples with standard dimensions, proceeding in accordance with point 5.5.1.2 of the standard. In the case of tensile strength during splitting, proceed in accordance with the standard PN-EN 206+A2: 2021-08 [10] point 5.5.1.3. The presented results can be converted to the strength obtained from

doprowadzają wodę tylko do powierzchni elementów lub obniżają jej powierzchniowe odparowywanie. W betonach masywnych o znacznej grubości woda zrasza tylko powierzchnię elementu i nie dociera do wnętrza przekroju poprzecznego. W rezultacie temperatura wewnątrz przekroju nie obniża się, a zastosowanie zraszania zimną wodą chłodzi tylko powierzchnię i może być procesem niepożądanym. Jednocześnie przy znacznym ograniczaniu wskaźnika wodno-cementowego, ilość wody zarobowej w składzie mieszanki betonowej może być niewystarczająca do przebiegu prawidłowego jej wiązania.

Rocznie na świecie produkuje się przeszło 14 mld m³ betonu, co czyni ten wyrób budowlany drugim po wodzie najczęściej używanym materiałem [2]. Szacuje się, że 5–15% (0,7–2,1 mld m³ rocznie) globalnie produkowanego betonu wykorzystuje się do produkcji elementów masywnych, dlatego też analizy zachowania betonów masywnych są przedmiotem badań wielu badaczy.

Kiernożycki [3] opracował równania określające teoretyczną temperaturę twardnienia betonu w konstrukcjach masywnych, wykorzystując równania różniczkowe Fouriera. Klemczak [1] szczegółowo analizowała i opisała rozkład naprężeń termiczno-skurczowych w przekrojach płyt masywnych. Skupiała się również na wpływie twardnienia na zmianę rozkładu naprężeń. Jaromska i Zych [4] analizowali oraz sparametryzowali wpływ różnych ryzyk, zarówno projektowych, jak i wykonawczych na poziom zarysowania płyt fundamentowych. Żmij [5] przeprowadziła analizę rozkładu odkształceń termiczno-skurczowych w masywnych płytach posadowionych na palach, w której oszacowała również wpływ skrępowania podpór. Klemczak oraz Knoppik-Wróbel [6] analizowały wpływ warunków prowadzenia robót na ryzyko powstania wczesnych rys termiczno-skurczowych w fundamentach masywnych. Minch [7] opracował zestawienie porównawcze pola przekroju zastosowanego w zrealizowanym projekcie w stosunku do własnych obliczeń weryfikacyjnych oraz wymagań normowych, bazując na rzeczywistej awarii płyty fundamentowej w postaci nadmiernego zarysowania skurczowego.

Wymienione pozycje literaturowe nie poruszają jednak zagadnienia rzeczywistych pomiarów temperatury dojrzewania betonu niskoemisyjnego w zrealizowanych płytach fundamentowych budynków wysokościowych. W artykule przedstawimy więc wyniki badań temperatury w rzeczywistej płycie fundamentowej budynku wysokościowego wybudowanego w Polsce. Na podstawie otrzymanych wartości pomiarów opracowano program warunków wilgotnościowo-temperaturowych w przypadku próbek betonowych wykonywanych do badań laboratoryjnych. W przygotowanych próbkach zastosowano receptury mieszanek betonowych zbliżone do wykonanych w przedmiotowych budynkach. W artykule przedstawiono również wyniki badań doświadczalnych wytrzymałości na ściskanie oraz wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu 48 próbek sześciennych betonu o wymiarach 10×10×10 cm wg PN-EN 12390-1: 2021-12 [8], dojrzewających w różnych warunkach temperaturowo-wilgotnościowych. Zgodnie z normą PN-B-06265:2022-08 [9], stanowiącą polskie uzupełnienie europejskiej normy PN-EN 206+A2:2021-08 [10], dostosowując jej postanowienia do krajowych warunków i wyma-

tests of standard samples. The varied environmental conditions of sample curing were intended to reflect the curing conditions of concrete located at the surface of a massive foundation slab (where humidity is higher due to curing and curing temperature is lower) and within the cross-section of the slab (where humidity is lower due to limited water migration and curing temperature is higher).

Concrete mix parameters

The concrete mix recipe used to make the test samples was the same as for the foundation slabs in high-rise buildings. A similar recipe was also used for the foundation slabs of high-rise buildings, where the actual temperature distribution in the concrete cross-section over time was analyzed. The mixture was prepared using CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA blast furnace cement, washed river sand with a fraction of 0–2 mm, coarse natural aggregate with a fraction of 2–32 mm, fly ash, water and plasticizer. The content of the individual components of the mixture is presented in Table 1.

The obtained concrete had a density of about 2330 kg/m³, water-cement ratio w/c was 0.58, and taking into account fly ash as a binder $w/(c+p)$ was 0.44. The concrete mix formula can be classified as low-carbon concrete, assessing the impact of the product on the environment at individual stages of its use.

Table 1. Concrete mix recipe for testing concrete samples

Tabela 1. Receptura mieszanki betonowej przeznaczonej do badań próbek betonowych

Cement [kg/m ³]	Sand/ Piasek [kg/m ³]	Gravel/ Żwir [kg/m ³]	Fly ash/ Popiół lotny [kg/m ³]	Water/ Woda [kg/m ³]	Plasticizer/ Plastyfikator [l/m ³]
270	690	1120	90	157	5

Preparation and curing conditions of concrete samples

The concrete mix was formed into 100 mm cube samples (photo 1). Flatness, cuboidity and dimensional deviations were tested in accordance with the requirements of PN-EN 12390-1:2021 [8]. The mix was vibrated in the molds using a vibrating table with a frequency in accordance with the requirements of PN-EN 12390-2:2019 [11].

Fourty-eight 100×100×100 mm cubic samples of concrete were made from the same mix recipe and the same ingredients at a ready-mix concrete plant. The samples were divided into three groups, each consisting of 16 pieces. Samples from the first and second groups were placed on the grids of a humidity chamber.

Samples from the first group matured for the first 24 h in laboratory conditions compliant with the requirements of the PN-EN 12390-2:2019–07 standard [11], at a temperature of $T_1^1 = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ and humidity above 95%. Then, the samples were transferred to a chamber where they matured for the next 24 h at a temperature of $T_2^1 = 65^\circ\text{C}$ and humidity of $w_2^1 50\% \pm 5$, and for the next 3 days in a chamber at a temperature of $T_3^1 = 85^\circ\text{C}$, while the humidity was still maintained at $w_3^1 50\% \pm 5$.

gań, w celu określenia wytrzymałości na ściskanie na próbkach o długości krawędzi 100 mm, należy przeliczyć wynik na próbki o normowych wymiarach, postępując zgodnie z punktem 5.5.1.2 normy. W przypadku wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu należy postępować zgodnie z normą PN-EN 206+A2:2021-08 [10] punkt 5.5.1.3. Prezentowane wyniki mogą być przeliczone na wytrzymałość uzyskaną z badań próbek normowych. Zróżnicowane warunki środowiskowe dojrzewania próbek miały na celu odzwierciedlenie warunków dojrzewania betonu znajdującego się przy powierzchni masywnej płyty fundamentowej (gdzie wilgotność jest większa ze względu na pielęgnację, a temperatura dojrzewania niższa) oraz wewnątrz przekroju poprzecznego płyty (gdzie wilgotność jest mniejsza ze względu na ograniczoną migrację wody, a temperatura dojrzewania wyższa).

Parametry mieszanki betonowej

Receptura mieszanki betonowej, z której wykonano próbki do badań, była taka jak w przypadku płyt fundamentowych w budynkach wysokościowych. Podobną recepturę wykorzystano również w płytach fundamentowych budynków wysokościowych, w których analizowano rzeczywisty rozkład temperatury w przekroju betonu w czasie. Do przygotowania mieszanki wykorzystano cement hutniczy CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA, piasek rzeczny płukany o frakcji 0–2 mm, kruszywo naturalne grube o frakcji 2–32 mm, popiół lotny, wodę oraz plastyfikator. Zawartość poszczególnych składników mieszanki przedstawiono w tabeli 1.

Otrzymany beton miał gęstość ok. 2330 kg/m³, stosunek wodno-cementowy w/c 0,58, a uwzględniając popiół lotny jako spoiwo $w/(c+p)$ wyniósł on 0,44. Recepturę mieszanki betonowej można zakwalifikować jako beton niskoemisyjny, oceniając oddziaływanie produktu na środowisko w poszczególnych etapach jego wykorzystania.

Przygotowanie i warunki dojrzewania próbek betonowych

Mieszanke betonową zaformowano w próbki sześciennie o boku 100 mm (fotografia 1). Zbadano płaskość, prostopadłościowość oraz odchyłki wymiarów zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12390-1:2021 [8]. Mieszanka została zawibrowana w formach za pomocą stołu wibracyjnego o częstotliwości zgodnej z wymaganiami normy PN-EN 12390-2:2019 [11].



Photo 1. Concrete samples in molds
Fot. 1. Próbkę betonowe w formach

The samples from the second group matured for the first 24 h also in laboratory conditions compliant with the requirements of the PN-EN 12390-2:2019-07 standard [11], i.e. at a temperature of $T_1^1 = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ and humidity w_1^1 above 95%. Then, after being transferred to the chamber, they matured for another 24 h at a temperature of $T_1^2 = 35^\circ\text{C}$ and humidity of $w_1^2 = 50 \pm 5\%$, and for the next 3 days the temperature in the chamber was $T_2^2 = 45^\circ\text{C}$, while the humidity w_2^2 was $50 \pm 5\%$.

After five days of curing, the samples from the first and second groups were seasoned in conditions compliant with the requirements of the PN-EN 12390-2:2019-07 standard [11] in a climatic chamber. The temperature in the chamber was $= 20 \pm 2^\circ\text{C}$, and the relative air humidity was above 95%. The temperature was checked with a calibrated thermometer, and the humidity with a thermohygrometer with a valid calibration certificate.

The third group of samples matured from the beginning, in a chamber, in conditions compliant with the PN-EN 12390-2:2019-07 standard [11], i.e. at a temperature of $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ and relative air humidity greater than 95%. Table 2 presents a comparison of temperature and humidity depending on the considered day of curing of individual groups of concrete samples.

The curing conditions of the samples were selected to reflect the actual conditions of concrete curing inside the massive foundation. The temperature measurement curves taken over 7 days for a 190 cm thick high-rise building foundation were used to calibrate the curing conditions of the samples. The measurements were taken in late spring, when the average air temperature during the day was approximately $T_d = 20^\circ\text{C}$, while the temperature at night did not drop below $T_n = 13^\circ\text{C}$. The measurements were taken using PT100 calibrated sensors in a continuous manner. The temperature of the mix during concreting reached the value of $T_b = 21\text{--}26^\circ\text{C}$. The curing conditions of group II samples precisely reflect the change in the temperature of the concrete inside the foundation, while group I samples correspond to the typical curing temperature of concrete in massive foundations with a thickness greater than 3 m in the case of concrete class C45/55. From such concrete classes, isolated fragments or entire sections of slabs are made in particularly stressed areas.

The temperature values of the samples from group I were assumed based on own measurements of the temperature inside other foundation slabs of high-rise buildings in Poland.

Wykonano 48 próbek sześciennych betonu o wymiarach $100 \times 100 \times 100$ mm z tej samej receptury mieszanki i z tych samych składników, w zakładzie produkcji betonu towarowego. Próbki podzielono na trzy grupy, a każda z nich liczyła po 16 szt. Próbki z pierwszej i drugiej grupy zostały umieszczone na rusztach komory wilgotnościowej.

Próbki z pierwszej grupy dojrzewały przez pierwsze 24 h w warunkach laboratoryjnych zgodnych z wymaganiami normy PN-EN 12390-2:2019-07 [11], w temperaturze $T_1^1 = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ i wilgotności w_1^1 powyżej 95%. Następnie, próbki przeniesiono do komory, w której przez kolejne 24 h dojrzewały w temperaturze $T_2^1 = 65^\circ\text{C}$, i wilgotności równej $w_2^1 50\% \pm 5$, a przez kolejne 3 doby w komorze w temperaturze $T_3^1 = 85^\circ\text{C}$, natomiast wilgotność w_3^1 była utrzymywana nadal na poziomie $50\% \pm 5$.

Próbki z drugiej grupy dojrzewały przez pierwsze 24 h również w warunkach laboratoryjnych zgodnych z wymaganiami normy PN-EN 12390-2:2019-07 [11], czyli w temperaturze $T_1^1 = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ i wilgotności w_1^1 powyżej 95%. Następnie, po przeniesieniu do komory, dojrzewały przez kolejne 24 h w temperaturze $T_1^2 = 35^\circ\text{C}$ i w wilgotności $w_1^2 = 50 \pm 5\%$, a przez kolejne 3 dni temperatura w komorze wynosiła $T_2^2 = 45^\circ\text{C}$, natomiast wilgotność w_2^2 była równa $50 \pm 5\%$.

Po pięciu dniach dojrzewania próbki z grupy pierwszej i drugiej sezonowano w warunkach zgodnych z wymaganiami normy PN-EN 12390-2:2019-07 [11] w komorze klimatycznej. Temperatura w komorze wynosiła $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, a wilgotność względna powietrza w powyżej 95%. Sprawdzenie temperatury wykonywano termometrem wzorcowanym, a wilgotności termohigrometrem posiadającym aktualne świadectwo wzorcowania.

Trzecia grupa próbek dojrzewała od początku, w komorze, w warunkach zgodnych z normą PN-EN 12390-2:2019-07 [11], czyli w temperaturze $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej powietrza w większej niż 95%. W tabeli 2 przedstawiono zestawienie temperatury i wilgotności w zależności od rozpatrywanego dnia dojrzewania poszczególnych grup próbek betonowych.

Warunki dojrzewania próbek zostały dobrane tak, aby odzwierciedlić rzeczywiste warunki dojrzewania betonu wewnątrz fundamentu masywnego. Do kalibracji warunków dojrzewania próbek wykorzystano krzywe pomiarów temperatury wykonane w czasie 7 dni w przypadku fundamentu budynku wysokościowego o grubości 190 cm. Pomiaru zostały wyko-

Table 2. Thermal and moisture conditions for curing concrete samples

Tabela 2. Warunki termiczno-wilgotnościowe dojrzewania próbek betonowych

Sample group no./ Nr grupy próbek	Thermal and humidity conditions/Warunki termiczno-wilgotnościowe									
	$t = 24$ h		$t = 24\text{--}48$ h		$t = 3\text{--}5$ dni		$t = 6\text{--}28$ dni		$t = 29\text{--}56$ dni	
	T [°C]	w [%]	T [°C]	w [%]	T [°C]	w [%]	T [°C]	w [%]	T [°C]	w [%]
I	20 ± 2	≥ 95	65 ± 2	50 ± 5	85 ± 2	50 ± 5	20 ± 2	≥ 95	20 ± 2	≥ 95
II	20 ± 2	≥ 95	35 ± 2	50 ± 5	45 ± 2	50 ± 5	20 ± 2	≥ 95	20 ± 2	≥ 95
III	20 ± 2	≥ 95	20 ± 2	≥ 95	20 ± 2	≥ 95	20 ± 2	≥ 95	20 ± 2	≥ 95

Figure 1 shows the course of changes in the maturation temperature of the samples from group I and group II, together with the results of three measurement points located inside the foundation of the high-rise building.

Strength tests

After 5, 14, 28 and 56 days, the samples were tested for compressive strength in accordance with the requirements of the PN-EN 12390-3:2019-07 standard [12] and for splitting tensile strength in accordance with the requirements of the PN-EN 12390-6:2024-04 standard [13]. It was assumed that two tests would be carried out in each maturation time interval of samples from each group. The curing chambers allowed for storing 16 samples. The strength result was the average value of the test of two samples. In accordance with the requirements of the PN-EN 206+A2:2021-08 standard, Annex B [10, 14], regarding the minimum number of results for concrete identity tests, the average value of the test of two samples is the re-

nane późną wiosną, gdy średnia temperatura powietrza w ciągu dnia wynosiła ok. $T_d = 20^\circ\text{C}$, natomiast temperatura w nocy nie spadała poniżej $T_n = 13^\circ\text{C}$. Pomiary wykonano przy użyciu czujników wzorcowanych PT100 w sposób ciągły. Temperatura mieszanki podczas betonowania osiągała wartość $T_b = 21\text{--}26^\circ\text{C}$. Warunki dojrzewania próbek grupy II dokładnie odzwierciedlają zmianę temperatury betonu wewnątrz fundamentu, natomiast próbki grupy I odpowiadają typowej temperaturze dojrzewania betonu w fundamentach masowych o grubości większej niż 3 m w przypadku betonów klasy C45/55. Z takich klas betonu wykonywane są wyodrębnione fragmenty lub całe sekcje płyt w obszarach szczególnie wyťažonych.

Wartości temperatury próbek z grupy I przyjęto na podstawie pomiarów własnych temperatury wewnątrz innych płyt fundamentowych budynków wysokościowych w Polsce. Na rysunku 1 przedstawiono przebieg zmian temperatury dojrzewania próbek z grupy I oraz grupy II wraz z wynikami trzech punktów pomiarowych znajdujących się wewnątrz fundamentu budynku wysokościowego.

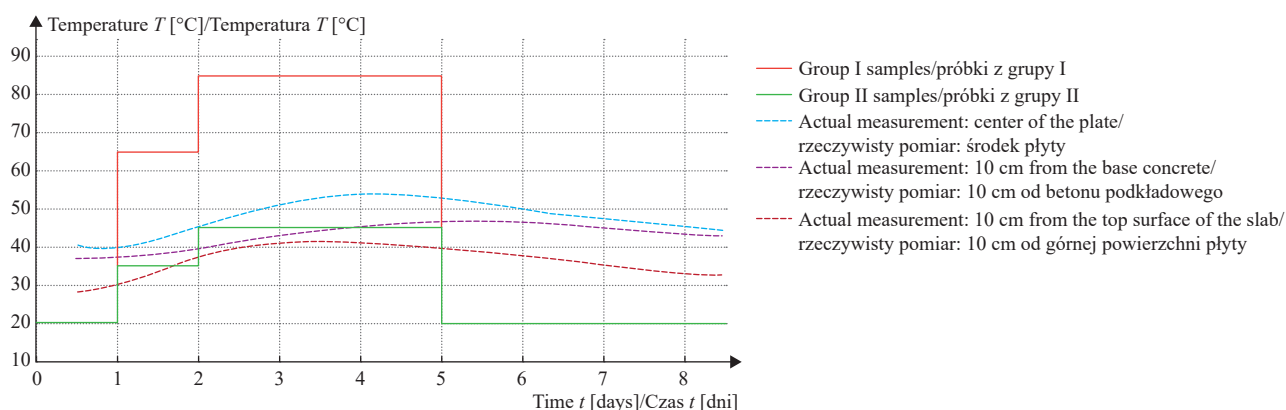


Fig. 1. Concrete maturation temperature over time for experimental samples and actual measurements of concrete maturation temperatures in the foundation of a high-rise building

Rys. 1. Temperatura dojrzewania betonu w czasie w przypadku próbek doświadczalnych i rzeczywiste pomiary temperatury dojrzewania betonu w fundamencie budynku wysokościowego

sult for assessing the strength class. Photographs 2 and 3 show samples during strength tests and sample readings obtained from the machine. The tests were performed on a Controls Pilot 5000 automatic testing machine, with first-class accuracy in the tested force ranges, and a current calibration certificate.

Test results and discussion

The results were presented in the form of graphs showing the obtained values of compressive strength and tensile strength at splitting of samples cured in the described conditions (Figures 2 and 4) and as average values (Figures 3 and 5). The compressive strength class of concrete was determined on samples cured in standard conditions according to PN-EN 12390-2:2019-07 [11], in accordance with the curing conditions of group III samples. In the case of samples from this group, an increase in compressive and tensile strength at splitting over time was found, typical for this type of concrete using CEM III cement and fly ash, i.e. a small increase in early strength and a long time of strength development (Figures 2÷5).

Badania wytrzymałości

Próbki po upływie 5, 14, 28 oraz 56 dni poddano badaniom wytrzymałości na ściskanie zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12390-3:2019-07 [12] oraz wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12390-6:2024-04 [13]. W ramach badań przyjęto, że zostaną przeprowadzone po dwie próby w każdym przedziale czasowym dojrzewania próbek z każdej grupy. Komory do sezonowania pozwalały na przechowywanie szesnastu próbek. Wynik wytrzymałości stanowiła wartość średnia z badania dwóch próbek. Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 206+A2:2021-08 załącznik B [10, 14], dotyczącymi minimalnej liczby wyników przy badaniach identyczności betonu, wartość średnia z badania dwóch próbek stanowi wynik do oceny klasy wytrzymałości. Na fotografiach 2 i 3 przedstawiono próbki podczas badań wytrzymałości i przykładowe odczyty otrzymane z maszyny. Badania wykonano na automatycznej maszynie wytrzymałościowej Controls Pilot 5000, o pierwszej klasie dokładności w badanych zakresach siły, posiadającej aktualne świadectwo wzorcowania.

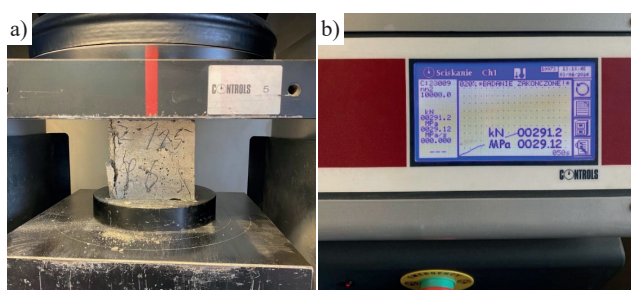


Photo 2. Concrete specimen after compression failure (a) and the result of the failure force (b)

Fot. 2. Próbką betonową po zniszczeniu przy ściskaniu (a) oraz wynik siły niszczącej (b)

Curing concrete in conditions reflecting the conditions inside massive foundation slabs (group II samples), with humidity of about 50%, changes the properties of concretes with low heat of hydration and accelerates the growth of initial strength. As a consequence, this leads to drying of the sample interior and a decrease in both compressive strength and tensile strength during splitting at a later stage compared to samples curing under standard conditions. Temperature and humidity are of crucial importance for both compressive strength and tensile strength at splitting. Both values decrease significantly with increasing temperature and decreasing humidity during curing. The temperature of group II samples was selected to reflect the actual curing temperature of concrete in massive foundation slabs (Figure 1). The dashed

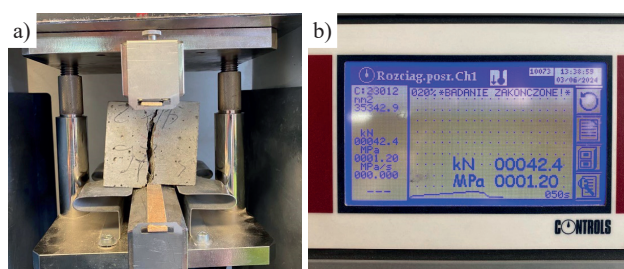


Photo 3. Concrete specimen after failure in tension by splitting (a) and the result of the destructive force (b)

Fot. 3. Próbką betonową po zniszczeniu przy rozciąganiu (a) przez rozłupywanie oraz wynik siły niszczącej (b)

Wyniki badań i ich dyskusja

Wyniki zaprezentowano w formie wykresów przedstawiających uzyskane wartości wytrzymałości na ściskanie i wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek dojrzewających w opisanych warunkach (rysunki 2 i 4) oraz jako wartości uśrednione (rysunki 3 i 5). Klasę wytrzymałości na ściskanie betonu określano na próbkach dojrzewających w warunkach normowych wg PN-EN 12390-2:2019-07 [11], zgodnie z warunkami dojrzewania próbek grupy III. W przypadku próbek z tej grupy stwierdzono zwiększenie wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu w czasie typowe dla tego rodzaju betonów z użyciem cementu CEM III i popiołu lotnego, czyli niewielki przyrost wytrzymałości wczesnej oraz długi czas przyrastania wytrzymałości (rysunki 2÷5).

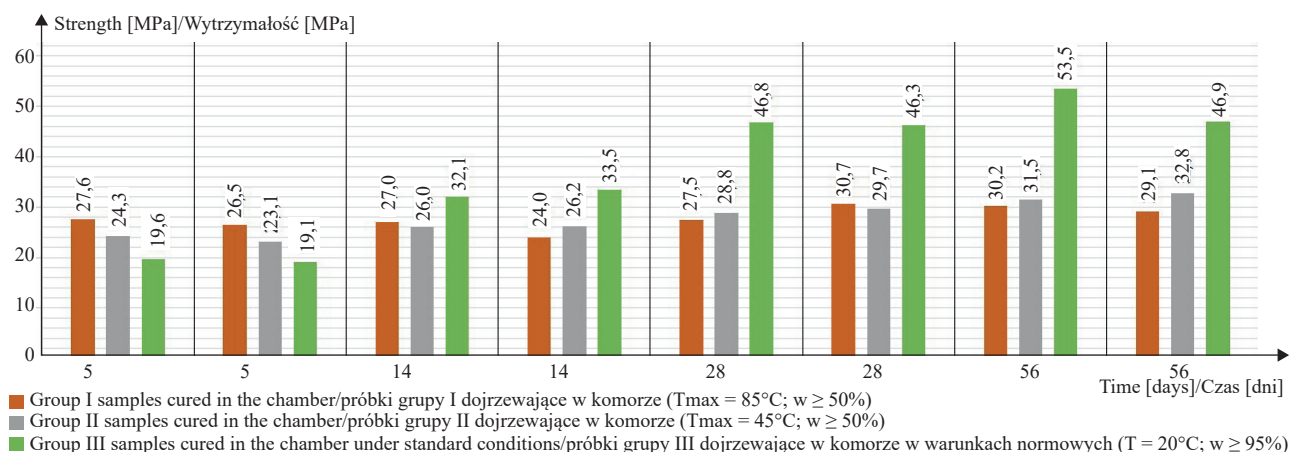


Fig. 2. Compressive strength test results of specimens matured under different conditions

Rys. 2. Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie próbek dojrzewających w różnych warunkach

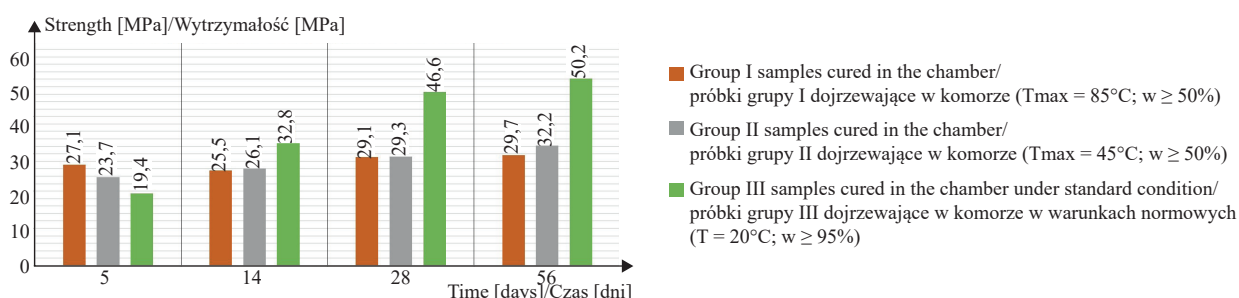


Fig. 3. Average results of compressive strength tests of specimens matured under different conditions

Rys. 3. Średnie wyniki badania wytrzymałości na ściskanie próbek dojrzewających w różnych warunkach

lines indicate the temperature in the 1.9 m thick section of the foundation slab, and the concrete used had a composition similar to that from which the test samples were made. The phenomenon of concrete drying and change in strength are also observed in high-strength concretes.

Group I samples corresponding to the humidity and temperature conditions in which concrete matures in massive foundations with a thickness greater than 3 m, made of concrete class C45/55, showed a similar decrease in compressive strength and tensile strength at splitting as group II samples.

Group II and group III samples showed similar characteristics of reduction in compressive and tensile strength at splitting compared to group I samples cured under standard conditions. In the case of group II and III samples, drying of the interior of the concrete is observed, which results in changes in the hydration process. In concretes with low hydration heat, this causes irreversible changes in strength properties.

Dojrzwianie betonu w warunkach odzwierciedlających warunki występujące we wnętrzu masywnych płyt fundamentowych (próbki grupy II), przy wilgotności ok. 50%, powoduje zmianę właściwości betonów o małym cieple hydratacji oraz przyspieszenie narastania wytrzymałości początkowej. W konsekwencji prowadzi to do przesuszenia wnętrza próbki i zmniejszenia zarówno wytrzymałości na ściskanie, jak i rozciąganie przy rozłupywaniu w późniejszym okresie w porównaniu z próbkami dojrzewającymi w warunkach normowych. Temperatura i wilgotność mają zasadnicze znaczenie zarówno w przypadku wytrzymałości na ściskanie, jak i rozciąganie przy rozłupywaniu. Obie wartości znacznie się zmniejszają wraz ze wzrostem temperatury i spadkiem wilgotności dojrzewania. Temperaturę II grupy próbek dobrano tak, aby odzwierciedlić rzeczywistą temperaturę dojrzewania betonu w masywnych płytach fundamentowych (rysunek 1). Liniami przerywanymi oznaczono temperaturę panującą w sekcji płyty fundamentowej o grubości 1,9 m, a zastosowany beton

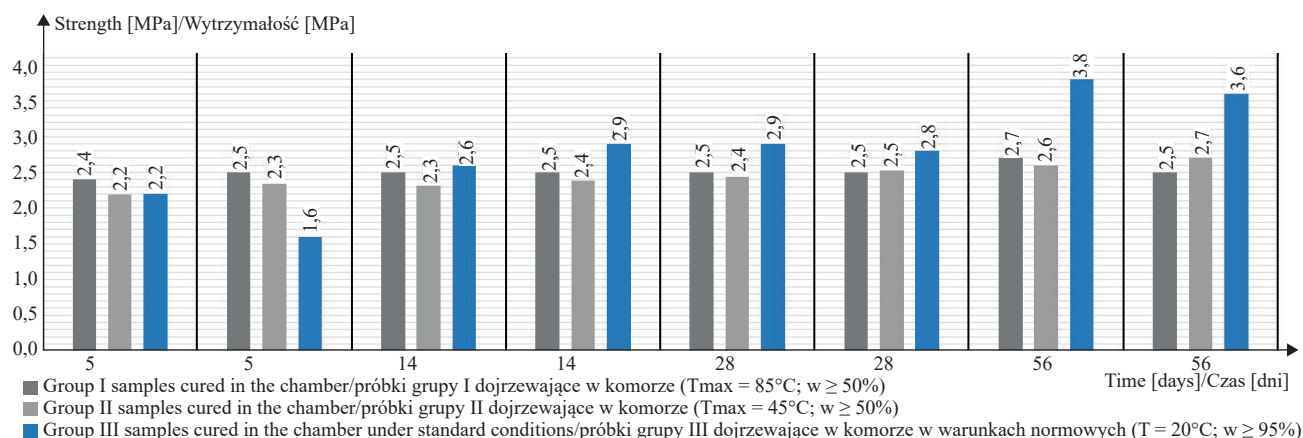


Fig. 4. Results of splitting tensile strength tests on specimens matured under different conditions

Rys. 4. Wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek dojrzewających w różnych warunkach

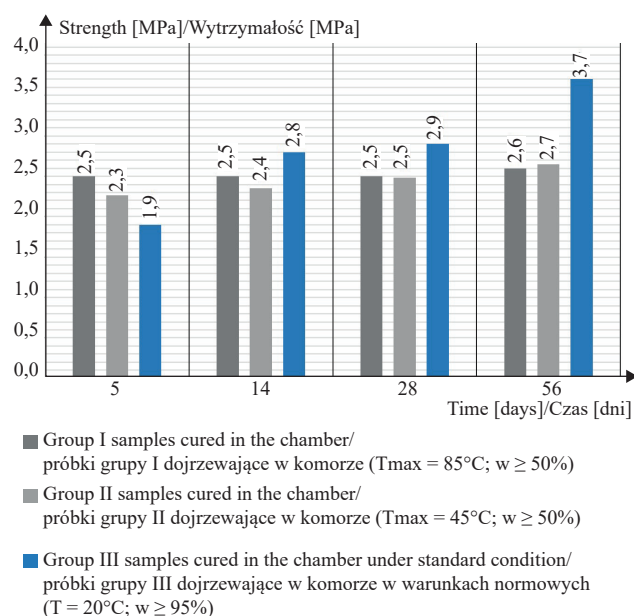


Fig. 5. Average results of splitting tensile strength tests on maturing specimens under different conditions

Rys. 5. Średnie wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek dojrzewających w różnych warunkach

miał zbliżony skład do tego, z którego wykonano próbki testowe. Zjawisko przesuszania betonu oraz zmiana wytrzymałości są obserwowane również w betonach o wysokiej wytrzymałości.

Próbki grupy I odpowiadające warunkom wilgotnościowo-temperaturowym, w których dojrzewa beton w fundamentach masywnych o grubości większej niż 3 m, z betonów klasy C45/55, wykazały podobne obniżanie się wytrzymałości na ściskanie oraz rozciąganie przy rozłupywaniu, jak próbki grupy II.

Próbki grupy II i grupy III wykazały podobną charakterystykę zmniejszenia wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu w porównaniu z próbkami grupy I dojrzewającymi w warunkach normowych. W przypadku próbek grup II i III obserwujemy przesuszenie wnętrza betonu, co skutkuje zmianami w procesie hydratacji. W betonach o niewielkim cieple hydratacji powoduje to nieodwracalne zmiany właściwości wytrzymałościowych.

Podsumowanie

Prezentowane badania wskazują na to, że w przypadku betonów wykonywanych z użyciem cementów o małym cieple hydratacji, przy dość wysokiej temperaturze dojrzewania i wilgotności ok. 50%, zjawiska przesuszania oraz obniżania wy-

Summary

The presented studies indicate that in the case of concretes made using cements with a low hydration heat, at a relatively high curing temperature and humidity of approx. 50%, the phenomena of drying out and lowering the compressive strength and tensile strength at splitting of concrete also occur (Figures 2 and 4). This has a fundamental impact on both the load-bearing capacity of the structure and the value of shrinkage strains or thermal stresses of the concrete. In massive structures, the maximum temperature allowed (by specifications) is up to 65°C, and sometimes 70°C. Modern concrete technology, allows the use of admixtures in the form of strong superplasticizers, enables for a significant reduction in the amount of water in concrete mixes. This allows for obtaining a relatively high strength, optimizing the amount of cement used and replacing the amount of clinker in it with additives in the form of blast furnace slag or fly ash. This allows for a significant reduction in the carbon footprint of the concretes used. When constructing massive structures, it is necessary to plan their curing, minimize moisture lost, and limit the setting temperature not only due to shrinkage or thermal stresses, but also due to the possibility of concrete drying out, which leads to a reduction in its strength parameters

Funding: University Research Grant, Institute of Civil Engineering WAT, 2025.

trzymałości na ściskanie i wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu betonu również występują (rysunki 2 i 4). Ma to zasadniczy wpływ zarówno na nośność konstrukcji, jak i na wartość odkształceń skurczowych, czy naprężenia termiczne betonu. W konstrukcjach masowych dopuszcza się (przez specyfikacje) maksymalną temperaturę do 65°C, a czasem 70°C. Współczesna technologia betonu, pozwalająca stosować domieszki w postaci silnych superplastyfikatorów, umożliwia znaczne obniżanie ilości wody w mieszankach betonowych. Pozwala tym samym na uzyskanie dość dużej wytrzymałości, optymalizując ilość użytego cementu oraz zamieniając w nim ilość klinkieru przez dodatki w postaci żużli wielkopieczowych czy popiołów lotnych. Pozwala to na znaczne zmniejszenie śladu węglowego stosowanych betonów. Podczas wykonywania konstrukcji masowych należy planować ich pielęgnację, minimalizować odprowadzanie wilgoci, ograniczać temperaturę wiązania nie tylko ze względu na skurcz czy występowanie naprężeń termicznych, ale również na możliwość wystąpienia przesuszania betonów, prowadzącego do zmniejszenia jego parametrów wytrzymałościowych.

Finansowanie: Uczelniany Grant Badawczy, Instytut Inżynierii Lądowej WAT, 2025 r.

Received: 05.05.2025

Revised: 30.05.2025

Published: 24.06.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 05.05.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 30.05.2025 r.

Opublikowano: 24.06.2025 r.

Literatura:

- [1] Klemczak B. Masywne konstrukcje betonowe. XXXIII Ogólnopolskie warsztaty pracy projektanta konstrukcji, Szczyrk; 2018.
- [2] Monteiro P, Miller S & Horvath A. Towards sustainable concrete. *Nature Mater* 16; 2017. 698–699.
- [3] Kiernozyci W. Betonowe konstrukcje masywne: Teoria, wymiarowanie, realizacja. Wydawnictwo Polski Cement; 2003.
- [4] Jaromska E., Zych M. Szacowanie ryzyka zarysowania płyt fundamentowych według wytycznych niemieckich – komentarz. *Przegląd Budowlany*. 9/2019.
- [5] Żmij A. Wymuszone naprężenia termiczno-skurczowe w płytach fundamentowych posadowionych na palach. *Nowoczesne projektowanie i realizacja konstrukcji budowlanych, Konkret*. 2018.
- [6] Klemczak B, Knoppik-Wróbel A. Wpływ warunków prowadzenia robót betonowych na ryzyko powstania wczesnych rys termiczno-skurczowych. *Przegląd Budowlany*. 2/2013.
- [7] Minch M. Naprężenia skurczowe w płytach fundamentowych. *Materiały Budowlane*. 2014;6: s. 54–55

- [8] PN-EN 12390-1: 2021-12, Badania betonu – Część 1: Kształt, wymiary i inne wymagania dotyczące próbek i form.
- [9] PN-B-06265:2022-08, Beton – Wymagania, właściwości użytkowe, produkcja i zgodność – Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A2:2021-08.
- [10] PN-EN 206+A2:2021-08, Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [11] PN-EN 12390-2:2019-07, Badania betonu – Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych
- [12] PN-EN 12390-3:2019-07, Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
- [13] PN-EN 12390-6:2024-04, Badania betonu – Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań.
- [14] Peraj P. Badania i analiza wpływu temperatury dojrzewania betonu na skurcz i nośność konstrukcji żelbetowych. Praca magisterska WAT; 2024.