*dr inż. Marek Maj**
*dr hab. inż. Andrzej Ubysz, prof. PWr.**

Procesy egzotermiczne w wielkogabarytowych elementach betonowych

Exothermic processes in large-size concrete constructions

Streszczenie. W wielkogabarytowych elementach żelbetowych rozkład temperatury wynikającej z ciepła hydratacji w fazie wiązania betonu odgrywa istotną rolę w minimalizowaniu negatywnych skutków naprężeń termicznych w betonie. W artykule przedstawiono wybrane metody obniżania temperatury betonu przez dobór jego recepty i monitorowane schładzanie cieczą w rurach stalowych rozmieszczonych w masywie betonowym.
Słowa kluczowe: fundamenty wielkogabarytowe, chłodzenie betonu.

Abstract. In the reinforced concrete elements with large dimensions the distribution of temperature during the setting and harding of concrete has important role in minimizing the effect of shrinkage self-stresses. The most important factors reducing the temperature during the hydration process, include: choosing the appropriate formula of the concrete mix and the exit of heat to the outside of the structure.
Keywords: large-size foundations, cooling of concrete.

Istotną sprawą przy projektowaniu receptur mieszanek betonowych, przeznaczonych do wykonania konstrukcji masywnych, jest dobór cementu o niskim cieple hydratacji, a po ułożeniu betonu znajomość rozkładu temperatury w betonowanym elemencie i wynikających z tego rozkładu naprężeń w poszczególnych częściach masywnych. Konstrukcje masywne wymagają nie tylko sterowania szybkością procesu hydratacji przez odpowiedni dobór składników mieszanki betonowej (kruszywo z dużą zawartością frakcji grubych w celu maksymalnego obniżenia zawartości cementu w 1 m^3 betonu), ale również zaprojektowania sposobu odprowadzania nadmiaru ciepła hydratacji na zewnątrz konstrukcji. Informacje uzyskane podczas pomiarów temperatury w ważnych dla konstrukcji punktach, w czasie całego procesu wiązania betonu, służą z kolei do odpowiedniego sterowania procesem chłodzenia.

Receptura mieszanki betonowej

Podstawową zasadą prawidłowo zaprojektowanej mieszanki betonowej do konstrukcji masywnych jest odpowiedni dobór ilościowy i jakościowy składników, ze szczególnym uwzględnieniem rodzaju zastosowanego cementu oraz rodzaju i ilości dodatków mineralnych (np. dodatków mineralnych o niskim cieple hydratacji, jak popioły lotne). Stosowane różnego rodzaju opóźniacze wiązania betonu sprawiają, że przyrost ciepła hydratacji trwa dłużej i w dłuższym czasie to ciepło można odprowadzić na zewnątrz konstrukcji. Równie ważne jest niedopuszczenie do dużej lokalnej różnicy temperatury.

Istotnym zagadnieniem przy projektowaniu receptury mieszanki betonowej jest dobór ilości stosowanego spoiwa. Ocenia się wg [1], że wzrost maksymalnej temperatury betonu przy braku wymiany ciepła wynosi 12 °C na każde 100 kg cementu w 1 m^3 betonu (przy zawartości cementu 300 ÷ 600 kg/m^3), np. wzrost temperatury betonowego bloku wysokości 4 m może wynieść ok. 50 °C (ograniczenia temperatury podczas wiązania betonu wynoszą 50 ÷ 60 °C).

Innymi czynnikami zmniejszającymi temperaturę jest obniżenie poziomu w/c oraz stosowanie kruszywa o możliwie największym wymiarze ziarna. Takie kruszywo z reguły ma mniejszą zawartość frakcji drobnych, a tym samym redukuje ilość cementu i wody, a duża średnica kruszywa wydatnie ogranicza skurcz betonu. Zastosowanie stosu okruchowego o możliwie największym wymiarze ziaren kruszywa grubego skutkuje mniejszą powierzchnią rozwinięcia. Drobne frakcje zwiększają natomiast stosunek w/c i urabialność betonu, co ułatwia jego transportowanie. Pozwalają także na dokładniejsze ułożenie betonu w przypadku dużej liczby prętów zbrojeniowych, co ma często miejsce w fundamentach pod duże maszyny przemysłowe.

Posadowienie

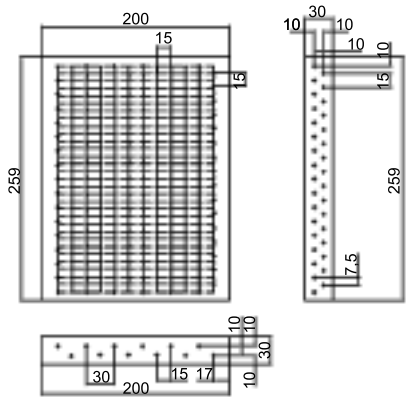
Większość masywnych konstrukcji betonowych przenosi znaczne obciążenia całkowite, które należy rozłożyć na grunt na stosunkowo dużej powierzchni. Przy posadowieniu bezpośrednim wykonanie prac zbrojarskich i betoniarskich na warstwie chudego betonu z reguły jest niewystarczające. Przy wykonywaniu masywnych bloków fundamentowych należy wówczas przewidzieć wykonanie warstwy pośredniej. Jest to najczęściej płyta z betonu konstrukcyjnego klasy C20/25 grubości kilkudziesięciu centymetrów (znane są konstrukcje, w których warstwa ta wynosiła 1,5 m).

Reduktory temperatury w bloku fundamentowym

Redukcja maksymalnej temperatury podczas procesu hydratacji i zmniejszanie gradientów między sektorami wielkogabarytowego betonowego bloku fundamentowego jest szczególnym zadaniem konstrukcyjnym polegającym na:

- ustaleniu geometrii źródeł chłodzenia (średnicy i rozstawu przewodów chłodzących – rysunek 1) i prędkości przepływu medium chłodzącego;
- organizacji systemu pomiarowego i lokalizacji sond do kontroli temperatury;

* Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego



Rys. 1. Schemat rozmieszczenia reduktorów temperatury [dm]

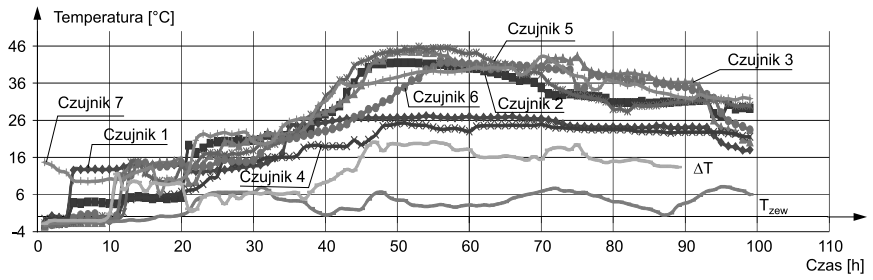
● określeniu sektorów chłodzenia ograniczających różnice temperatury pomiędzy strefami chłodzonymi i niechłodzonymi.

Reduktory temperatury są wykonane z ułożonych w betonie rur stalowych z przepływającą cieczą chłodzącą. Ilość odprowadzonego ciepła zależy od łącznej długości rur w obwodzie i prędkości przepływu cieczy. Miarą skuteczności układu chłodzącego jest jednostkowa powierzchnia pochłaniania radiacji. Przepływ ciepła Q przez ciało o powierzchni S i grubości d, przy różnicy temperatury ΔT oraz czasie przepływu t, dla współczynnika przewodzenia λ = 1,77 W/mK, można wyznaczyć ze wzoru $Q = \lambda \cdot S \cdot \Delta T \cdot t/d$.

Ze względu na złożoność zadania (wzajemne oddziaływanie przewodów instalacji chłodzącej, redukcja temperatury wody na długości itp.) zadanie to można rozwiązać z wykorzystaniem analizy porównawczej. Znając np. charakterystyki chłodzenia fundamentu wykonanego z betonu klasy C30/37, można dość dokładnie oszacować powierzchnie chłodzenia fundamentu o podobnych gabarytach z betonu C40/50.

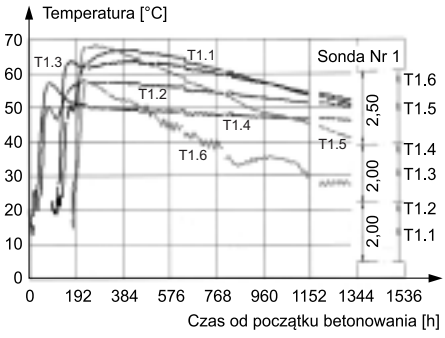
Efektywność chłodzenia

W projektach budowlanych betonowych elementów wielkogabarytowych ograniczenia najczęściej dotyczą maksymalnej wartości temperatury, która może wystąpić w betonie podczas wiązania oraz maksymalnych dopuszczalnych gradientów. Prawidłowy system chłodzenia nie tylko umożliwia kontrolę temperatury, ale również pozwala w znaczny sposób zmniejszyć gwałtowny wzrost temperatury w pierwszej fazie wiązania (rysunek 2).



Rys. 2. Zmiany temperatury w betonie oraz gradientu podczas dojrzewania i chłodzenia masywnej płyty fundamentowej. Kolejne serie oznaczają pomiary na poziomach 15 cm, 95, 175, 255, 175 (2), 95 (2), 15 (2), temperaturę zewnętrzną i gradient pomiędzy poziomami 175 i 255 cm

Porównano monitoring temperatury masywnej płyty betonowej (rysunek 2) i fundament mostu Rędzińskiego na Autostradowej Obwodnicy Wrocławia [2] z betonu o jedną klasę wyższą. Fundament mostu nie był wykonywany w technologii ciągłej, ale warstwami po 2 m wysokości z przerwami technologicznymi, do osiągnięcia maksymalnej temperatury w warstwie poprzedzającej [2, 3]. Ta technologia spowodowała, że maksimum temperatury wiązania osiągano przy znacznie szybszych jej przyrostach, co powodowało dodatkowe naprężenia termiczne w konstrukcji (rysunek 3).



Rys. 3. Temperatura mierzona podczas betonowania fundamentu mostu [4]

Znacznie dłuższy jest również okres, gdy temperatura pozostaje podwyższona w całej konstrukcji, co w niektórych przypadkach może utrudniać dalsze prace. Z badań [1] wynika, że więzy wewnętrzne związane z naprężeniami termicznymi powstają na skutek oddawania przez element ciepła do otoczenia, które zgodnie z prawem Newtona opisane jest równaniem

$$\rho_b = \alpha_b \cdot (T_s - T_z)$$

gdzie:

ρ_b – ciepło odprowadzone z powierzchni elementu;

α_b – współczynnik przejmowania ciepła na powierzchni elementu [W/m^{2}K];

T_s, T_z – temperatura powierzchni i otoczenia elementu.

W przypadku osiągnięcia krytycznej wartości odprowadzania ciepła z elementu, naprężenia rozciągające związane z rozszerzalnością cieplną wewnątrz konstrukcji i bezwładnością cieplną zewnętrznych warstw osiągają wartość przekraczającą wytrzymałość na rozciąganie młodego betonu.

Podsumowanie

Przedstawiony w artykule sposób obniżania temperatury betonu w konstrukcji masywnej podczas procesu hydratacji cementu polega na odprowadzeniu ciepła systemem rur z cieczą chłodzącą. Inną metodą obniżającą temperaturę wstępną betonu jest dodawanie schłodzonej wody lub stosowanie izolacji z lodu. Techniki chłodzenia fundamentu połączone są ze stałym monitoringiem temperatury i prognozowaniem jej zmiany. Dobór technologii chłodzenia stał się ważnym elementem przy projektowaniu technologii wykonywania masywnych konstrukcji betonowych.

Literatura

[1] Kaszuba S., Golda A.: Zabudowa betonu w konstrukcjach masywnych, Polski Cement, 2006–3–42.

[2] Czkwianianc A., Pawlica J., Walendziak R.: Technologia betonowania fundamentu pod pylon mostu przez rzekę Odrę w ciągu autostrady A8, Obiekty mostowe na autostradach i drogach ekspresowych, Wrocławskie Dni Mostowe 26 – 27.11.2009.

[3] Biliszczuk J., Barcik W., Onysyk J., Toczkiewicz R., Tukendorf A., Tukendorf K.: Redzinski Bridge in Wroclaw – The Largest Concrete Cable–Stayed Bridge in Poland. Structural Engineering International (IABSE) Vol. 24, No 2, May 2014. s. 292 – 295.

[4] Biliszczuk J., Onysyk J., Barcik W., Prabucki P., Sułkowski M., Szczepański M., Toczkiewicz R., Tomiczek M., Tukendorf A., Tukendorf K.: Most podwieszony w ciągu Autostradowej Obwodnicy Wrocławia, Obiekty mostowe na autostradach i drogach ekspresowych, Wrocławskie Dni Mostowe 26 – 27.11.2009.