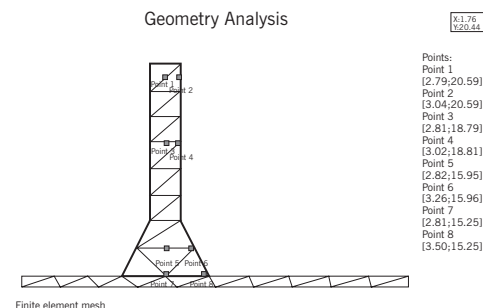


System symulacji i monitorowania cech młodego betonu w konstrukcji – przykłady praktycznego zastosowania

W poprzednim numerze kwartalnika „Budownictwo, Technologie, Architektura” [1] staraliśmy się Państwu pokazać możliwości, jakie stwarza w nowoczesnej technologii betonu zintegrowany system symulacji i monitorowania cech młodego betonu w konstrukcji. Zastosowanie opisywanego systemu, w trakcie wykonywania betonowych elementów konstrukcji, pozwala dobrać najbardziej optymalne rozwiązanie materiałowe, wskazuje newralgiczne miejsca w konstrukcji, gdzie należy się spodziewać największych naprężeń termicznych oraz pozwala dobrać odpowiedni sposób zabezpieczenia i przeciwdziałania negatywnym zjawiskom. Poniżej przedstawiono przykład praktycznego zastosowania systemu przez Dział Technologii Betonu RMC Polska Sp. z o.o.

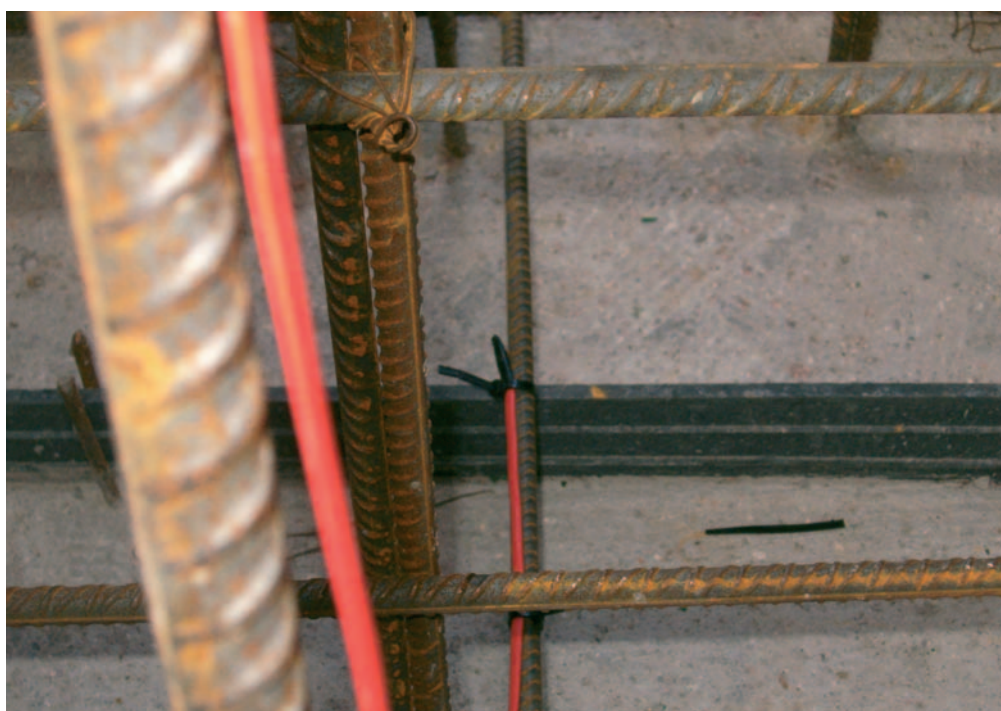
Ściany zbiornika oczyszczalni ścieków

Jednym z przykładów wykorzystania systemu jest monitorowanie temperatury oraz gradientów temperatur w masywnych ścianach zbiornika oczyszczalni ścieków. Klasa betonu wg projektu: C30/37, cechy trwałościowe określono dodatkowo stopniem wodoszczelności W8 oraz stopniem mrozoodporności F150. Wysokość ścian zbiornika dochodziła do 6 metrów, szerokość u podstawy 1,6 metra, u góry 0,6 metra (rys 1). Prace budowlane prowadzone były w okresie znacznych wahań temperatury otoczenia między dniem a nocą (2-20°C). Jako że betonowano element masywny, konieczne było przeprowadzenie szeregu badań i symula-



Rys. 1. Schemat betonowanego elementu – ściana oczyszczalni ścieków

cji, związanych z doбором zastosowanej mieszanki betonowej, głównie pod kątem ilości wydzielanego ciepła hydratacji. Jednym z celów było niedopuszczenie do powstania wysokich temperatur i gradientów w betonowanym bloku betonowym, które mogłyby spowodować powstanie mikropęknięć. Dodatkowo, istotnym powodem prowadzenia monitorowania było dobranie optymalnych czasów rotacji szalunków. Wykonawcy zależało na jak najszybszym rozszalowaniu zabetonowanego elementu, z drugiej jednak strony rozszalowanie ścian było możliwe w chwili, gdy różnica temperatury otoczenia i temperatury wewnątrz elementu byłaby na tyle niska, że nie powstaną rysy na skutek szoku termicznego. Autorzy w trakcie swojej pracy, spotkali się z sytuacjami, gdy z powodu zbyt wczesnego rozszalowania ścian różnice między temperaturą powietrza i temperaturą betonu wewnątrz ściany



Fot. 1. Instalacja czujników temperatury – termopar w betonowanej ścianie oczyszczalni ścieków



Fot. 2. Ogólny wygląd betonowanego zbiornika

foto: Archiwum

spowodowały powstawanie rys ze względu na gwałtowne ochłodzenie (A. Neville, Właściwości betonu, str. 550-554, Polski Cement, Kraków 2000). Zadaniem dostawcy mieszanki betonowej było wskazanie wykonawcy momentu bezpiecznego rozszalowania elementu pozwalającego na uniknięcie powstania tego typu rys skurczowych.

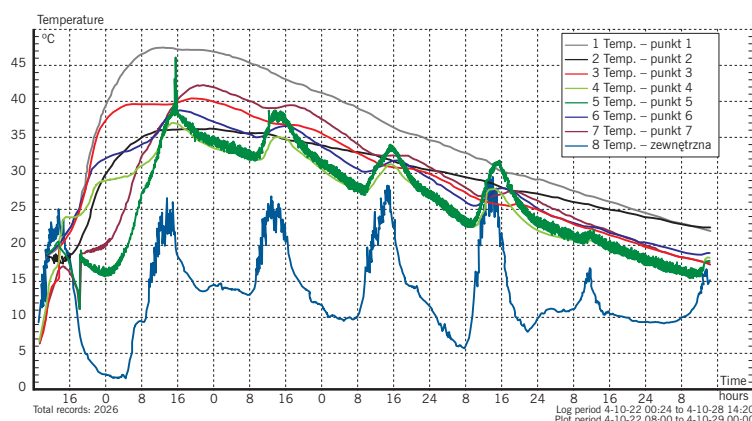
Pierwszym etapem było przeprowadzenie badań w „kabinie hydratacyjnej” i zebranie informacji na temat właściwości cieplnych zastosowanego betonu. Następnie wykonano szereg symulacji zachowania się betonu w elemencie konstrukcji dla różnych warunków atmosferycznych, sposobów zabezpieczenia i pielęgnacji elementu. Zakładano różne terminy rozszalowania ścian w zależności od przewidywanej temperatury otoczenia oraz temperatur w zabetonowywanym elemencie. Przeprowadzone symulacje pozwoliły na przekazanie szczegółowych wytycznych dotyczących harmonogramu betonowania i zaleceń pielęgnacji. Ustalono między innymi godzinę rozpoczęcia betonowania, tak aby w momencie wystąpienia maksymalnej temperatury w betonowanej ścianie temperatura powietrza była również najwyższa. Przekazano wytyczne na temat sposobu pielęgnacji (zastosowano w niektórych miejscach izolację w postaci folii bąbelkowej ze względu na niskie temperatury powietrza w nocy).

Na zdjęciach 1-2 pokazano przygotowania do monitorowania elementu i instalację aparatury na placu budowy. Wykresy 2 i 3 pokazują rzeczywiste temperatury w elemencie konstrukcji w najbardziej ekstremalnych punktach oraz gradient temperatury, jaki wystąpił między tymi punktami. „Najcieplejsze” miejsce elementu – punkt 1; temperatura przy szalunku – punkt 5. Na wykresie 4 pokazano zmianę „dojrzałości” betonu we wszystkich monitorowanych punktach konstrukcji. Na podstawie wykresu „dojrzałości” oszacowano wytrzymałość betonu w elemencie.

Przeprowadzony monitoring betonu w ścianie oczyszczalni ścieków pozwolił na potwierdzenie doboru prawidłowego rozwiązania recepturowego. Nie zostały przekroczone, podane w literaturze, maksymalne dopuszczalne temperatury

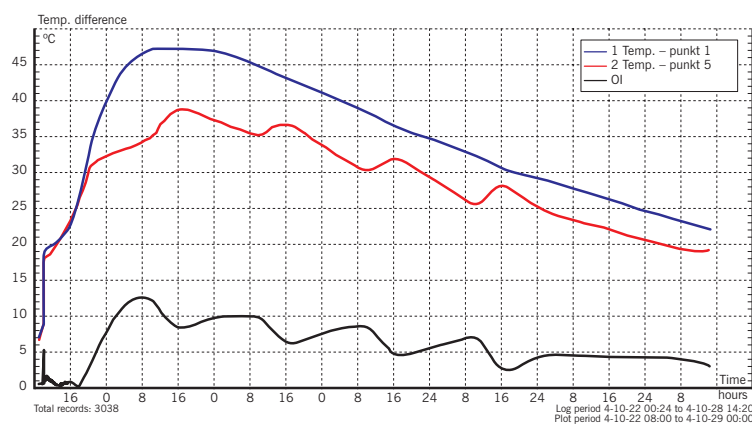
w bloku betonowym. Nie zostały również przekroczone dopuszczalne maksymalne gradienty temperatury w betonowanych ścianach. Wskazano wykonawcy najpierw sposób zabezpieczenia betonu przez warunkami atmosferycznymi, a potem termin bezpiecznego rozszalowania ścian i uniknięcie tym samym ryzyka powstania rys na skutek szor-

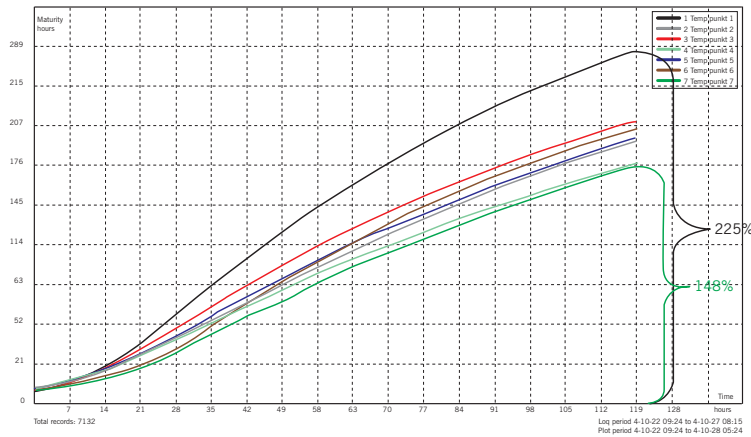
Rys. 2. Uzyskane temperatury w trakcie monitorowania ścian zbiornika oczyszczalni ścieków. Temperatury we wszystkich monitorowanych punktach i temperatura powietrza



ku termicznego. Oszacowano wytrzymałość betonu w konstrukcji po 119 godzinach, wykorzystując funkcję dojrzałości. Wytrzymałość betonu w najcieplejszym miejscu elementu oszacowano na 46,8 MPa, a w miejscu najchłodniejszym na 30,8 MPa.

Rys. 3. Uzyskane temperatury w trakcie monitorowania ścian zbiornika oczyszczalni ścieków. Gradient między punktami



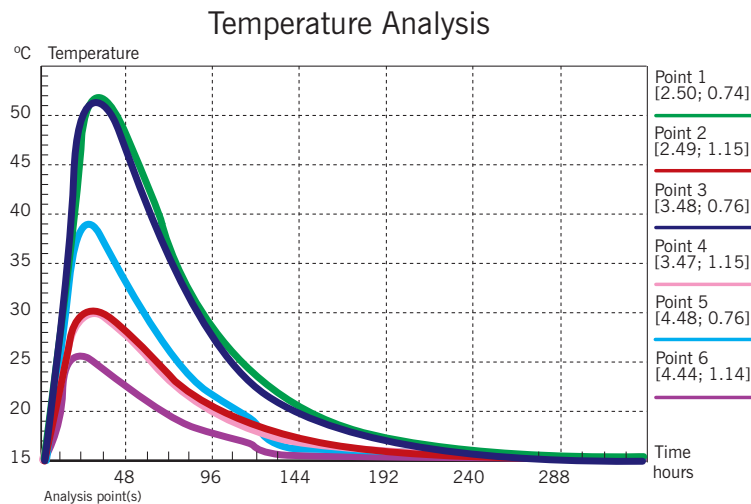


Rys. 4. Wykres dojrzałości betonu we wszystkich monitorowanych punktach. Ściana oczyszczalni ścieków

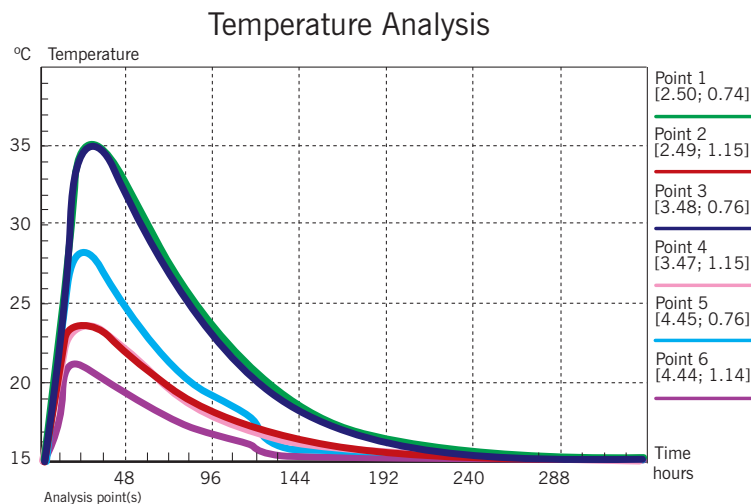
Płyta fundamentowa

Innym przykładem wykorzystania systemu był dobór rozwiązania materiałowego, które zastosowano betonując fundamentową płytę denną, grubości metra pod budynek mieszkalny. Przewidywana klasa betonu określona zgodnie z normą PN-EN 206-1 wynosiła C 30/37. Podstawowym celem było ograniczenie do minimum gradientów tempera-

Rys. 5a. Analiza temperatur w płycie fundamentowej – spoiwo cement CEM II/B-S 32,5R – recepta A



Rys. 5b. Analiza temperatur w płycie fundamentowej – spoiwo cement CEM III/A 32,5N + popiół lotny – recepta C



tur, powstających w płycie fundamentowej w trakcie procesów hydratacji cementu w początkowym okresie twardnienia betonu. Zaproponowano trzy rozwiązania recepturowe dla realizacji tego zadania.

nia. Recepta A – jako spoiwo zastosowano cement CEM II/B-S 32,5R; recepta B – spoiwo CEM III/A 32,5N; recepta C – CEM III/A 32,5N + popiół lotny zgodny z PN-EN 450. Wszystkie badane recepty wykonane były przy tym samym współczynniku wodno/cementowym. W każdym przypadku zastosowano również ten sam rodzaj superplastyfikatora. Dla powyższych rozwiązań recepturowych przeprowadzono badania w „kabinie hydratacyjnej” i określono ilość ciepła wydzielającą się w procesie twardnienia betonu w przeliczeniu na jeden kilogram cementu. Wyniki pomiarów ilości wydzielanego ciepła, jednoznacznie wskazywały, że ze względu na właściwości termiczne najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie do betonowania płyty recepty C. Dodatkowo wykonano symulację zachowania się betonów w elemencie konstrukcji, przy założonej stałej temperaturze powietrza równej 15°C. Wyniki symulacji dla dwóch skrajnych przypadków pokazano na rysunkach 5a i 5b – zmiany temperatury w wybranych punktach betonowanego elementu w funkcji czasu.

Opierając się na pokazanych na rysunkach 5a i 5b analizach temperatur powstających w płycie fundamentowej, zdecydowano się na wykonanie płyty z recepty C. Różnice temperatur między wnętrzem elementu, a jego powierzchnią nie przekroczyły 12°C. Maksymalna temperatura wewnątrz betonowego bloku wystąpiła w 30. godzinie po zabetonowaniu i wyniosła około 35°C. Powstały gradient jest bezpieczny z punktu widzenia powstania ewentualnych naprężeń termicznych w betonie, a osiągnięta maksymalna temperatura znacznie poniżej tzw. temperatury krytycznej.

Podsumowanie

Opisywany w dwóch kolejnych numerach kwartalnika „Budownictwo, Technologie, Architektura” system symulacji i monitorowania cech młodego betonu w konstrukcji – stwarza bardzo wiele możliwości zapewnienia bezpieczeństwa betonowania budowli. Nowoczesne budownictwo nie może obejść się bez nowoczesnej technologii betonu i nowoczesnego sprzętu. Opisywany system pozwala nie tylko monitorować temperatury, jakie powstają w elemencie konstrukcji w początkowym okresie twardnienia betonu. Daje możliwość wykonywania badań porównawczych pod kątem ilości wydzielanego ciepła, dla różnych betonów i receptur, przy wykorzystaniu „kabin hydratacyjnej”. Pozwala symulować zachowanie się betonu w różnych elementach konstrukcji z uwzględnieniem jej kształtu, zastosowanego deskowania, temperatur zewnętrznych, prędkości wiatru, sposobu pielęgnacji itp. Jeszcze przed przystąpieniem do betonowania elementu możliwy jest wybór najbardziej optymalnego rozwiązania materiałowego, które zagwarantuje uniknięcie powstania naprężeń termicznych prowadzących do powstania mikrospeków i rys w młodym betonie. Możliwe jest bardzo dokładne oszacowanie wytrzymałości betonu w wybranych miejscach elementu, co w przypadku prowadzenia betonowania w warunkach zimowych (termin rozszalowania) oraz przy elementach sprężonych jest niezmiernie istotne.

mgr inż. Rafał Gajewski
mgr inż. Łukasz Szabat