

## Symulacje procesu dojrzewania betonu dolnej płyty skrzynki mostowej

Jacek Chróścielewski<sup>1</sup>, Aleksandra Mariak<sup>1</sup>, Agnieszka Sabik<sup>1</sup>, Krzysztof Wilde<sup>1</sup><sup>1</sup>Katedra Wytrzymałości Materiałów, Politechnika Gdańska

email: jacek.chroscielewski@pg.gda.pl, aleksandra.mariak@pg.gda.pl, agnieszka.sabik@pg.gda.pl, krzysztof.wilde@pg.gda.pl

**STRESZCZENIE:** W pracy omówiono matematyczny model dojrzewania betonu uwzględniający kinetykę zachodzenia reakcji wiązania. Model ten zaimplementowano w autorskim programie, który wykorzystano do monitorowania efektów termicznych zachodzących w betonie dolnej płyty mostu typu extradosed. Podejście numeryczne zweryfikowano pomiarami doświadczalnymi i wykorzystano do oceny bieżącej wytrzymałości na ściskanie z uwagi na aktualny stopień hydratacji świeżego betonu.

**SŁOWA KLUCZOWE:** beton, dojrzewanie, temperatura, hydratacja, modelowanie

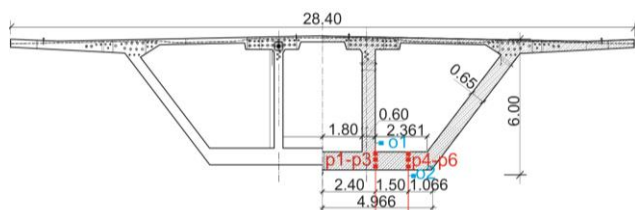
## 1. Wstęp

Nowe technologie pomiarowe i zaawansowane symulacje dostarczają narzędzi umożliwiających precyzyjne śledzenie procesu dojrzewania betonu w rzeczywistej konstrukcji. Informacja o aktualnych parametrach betonu jest szczególnie użyteczna przy produkcji prefabrykatów i przy sprężaniu betonowych modułów w celu skrócenia ich fazy budowy i wielokrotnego wykorzystania tych samych form przestawnych. Podejście to stosowane jest często podczas betonowania obiektów mostowych i budynkach wielokondygnacyjnych, gdzie wykorzystuje się betony wysokiej wytrzymałości, z myślą o optymalizacji tempa wznoszenia kolejnych segmentów. Monitorowanie betonu dojrzewającego, w tzw. młodym wieku, tj. w początkowym okresie jego twardnienia, umożliwia ocenę i działania zmierzające w kierunku ograniczenia uszkodzeń generowanych efektami termicznymi i skurczowymi, mającymi wpływ na trwałość konstrukcji. Ponadto na podstawie odpowiedniego opisu matematycznego dane z monitoringu są bazą do szacowania wytrzymałości bieżącej betonu *in situ* [1]. Fakt korelacji stopnia hydratacji (zaawansowania reakcji chemicznej) ze stosunkowo łatwą do monitorowania temperaturą twardniejącego betonu wykorzystany jest do określenia tzw. wskaźnika dojrzałości, którego funkcją jest poszukiwana aktualna sztywność i wytrzymałość betonu [1-4].

W pracy omówiono modelowanie zjawiska dojrzewania betonu dolnej płyty skrzynki mostowej z wykorzystaniem matematycznego opisu zmian temperatury i objętości uzyskanych z badań *in situ*.

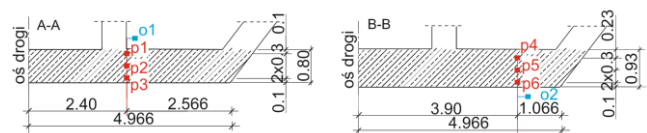
## 2. Opis obiektu mostowego

Cel badań stanowi monitoring dojrzewania betonu czteroprzęsłowego mostu drogowego typu „extradosed”. Konstrukcja nośna mostu jest typowa i ma formę trójkomorowej skrzynki o całkowitej szerokości 28,4 m (rys. 1) wykonanej z betonu sprężonego klasy C 60/75.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny w strefie podporowej  
Główne wymiary przekroju poprzecznego oraz spadki są

stałe na całej długości obiektu. Wysokość konstrukcji pomostu zmienia się od 4 m w przęsłach, do 6 m w strefach podporowych. Monitoring dojrzewania betonu realizowano w płycie dolnej sekcji startowej, której grubość jest zmienna od ~0,8 m do ~1,4 m. Pionowe ściany zewnętrzne skrzynki tej sekcji mają grubość 0,65 m, zaś wewnętrzne 0,6 m. Rozmieszczenie punktów pomiaru temperatury przedstawiono na rys. 2. Rejestrację temperatury prowadzono przy użyciu czujników *I-wire*.



Rys. 2. Lokalizacja punktów pomiaru temperatury

Opracowany system pomiarowy ma znamiona innowacji. Elektroniczny układ zarządzający pomiarami rozpoznaje czujniki na podstawie 16 cyfrowych numerów seryjnych. Parametry interfejsu *I-wire* umożliwiają podłączenie na odległość do 300 m. Pozwala to na wdrażanie tych czujników na placu budowy bez większych przeszkód. Opracowany system umożliwia pomiar temperatury w zakresie od  $-55^{\circ}\text{C}$  do  $+125^{\circ}\text{C}$  z dokładnością  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ .

## 3. Model matematyczny

Wynikiem reakcji wiązania cementu jest przejście zaczynu cementowego od stanu plastycznego do sztywnego, czemu towarzyszy ciągle wydzielanie ciepła. Proces ten jest szczególnie istotny w pierwszych dniach twardnienia betonu. Niejednorodne i niestacjonarne pole temperatury  $T(x,t)$  twardniejącego betonu kształtują się w zależności od rodzaju i ilości cementu, przewodności, pojemności cieplnej komponentów betonu, intensywności wymiany ciepła z otoczeniem, temperatury początkowej mieszanki betonowej oraz temperatury otoczenia. Istotny wpływ mają także wymiary i proporcje geometryczne wbudowanej mieszanki betonowej oraz sąsiedztwo gotowych bloków.

Termo-dynamiczne równanie polowe opisujące stan „młodego” betonu można zapisać w postaci (np. [1]):

$$CT + \nabla \circ Q_f = \dot{Q} \quad \text{tu} \quad \dot{Q} = Q_{\infty} \dot{\xi}, \quad (1)$$

gdzie:  $T$  – temperatura [K],

$C$  – pojemność cieplna [ $J/(m^3 \cdot K)$ ],

$Q$  – wewnętrzne źródło ciepła [ $W/m^3$ ],

$Q_f = -k_T \nabla T$  – strumień ciepła (prawo Fouriera) [ $W/m^2$ ],  
 $k_T$  – przewodność cieplna [ $W/(m \cdot K)$ ],  
 $Q_\infty$  – stała materiałowa [ $J/m^3$ ],  
 $\zeta = Q/Q_\infty$ ,  $\dot{\zeta}$  – stopień hydratacji [-] i jego prędkość [ $s^{-1}$ ].

Proces twardnienia betonu jest funkcją jego stopnia hydratacji  $\zeta$  uwarunkowanego termiką reakcji łączenia wody i cementu. Za kinetykę tych zmian odpowiada człon typu Arrheniusa  $\psi = \exp(-\frac{E_a}{RT})$ , zależny od temp.  $T$ , stałej  $R$  gazu doskonałego i energii aktywacji  $E_a$  [5]. Prędkość stopnia hydratacji  $\dot{\zeta} = \tilde{A}_\zeta \cdot \psi$  opisują trzy czony:

$$\dot{\zeta} = k \left( \frac{A_0}{k \zeta_\infty} + \zeta \right) (\zeta_\infty - \zeta) \cdot \frac{1}{n_0} \exp\left(-\bar{n} \frac{\zeta}{\zeta_\infty}\right) \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \geq 0. \quad (2)$$

Znormalizowane powinowactwo chemiczne to iloczyn  $\tilde{A}_\zeta = A_\zeta \cdot \eta$  powinowactwa chemicznego  $A_\zeta$  i  $\eta$ , tj. przepuszczalności związanej z mikrokrążeniem wolnej wody przez hydraty. Parametry materiałowe  $k$ ,  $A_0$ ,  $\zeta_\infty$ ,  $n_0$ ,  $\bar{n}$  wyznacza się na drodze doświadczalnej. Z formuły (2) wynika, że aktywacja cieplna opisana członem Arrheniusa  $\psi$  ma zasadnicze znaczenie fazy początkowej reakcji. W miarę postępu hydratacji reakcja ulega spowolnieniu, aż do osiągnięcia  $\zeta = \zeta_\infty$ . Równanie (2) pod warunkiem  $\dot{\zeta} \geq 0$ , spełnia wymóg realistycznego modelowania reakcji hydratacji [1].

#### 4. Rozwiązanie i symulacje numeryczne

Rozwiązanie  $T(x,t)$ ,  $\zeta(x,T,t)$  termo-dynamicznego nieliniowego układu równań (1) i (2) wymaga dwóch typów aproksymacji, po przestrzeni i w dziedzinie czasu, spełniających odpowiednie warunki zbieżności oraz uwzględnienia warunków początkowo-brzegowych.

Stosując metodę elementów skończonych (MES) wymaga się sformułowania wariacyjnego, z interpolacją klasy  $C^0$ . Inną drogą jest wykorzystanie metody różnic skończonych (MRS), a więc bezpośrednie rozwiązanie równania różniczkowego.

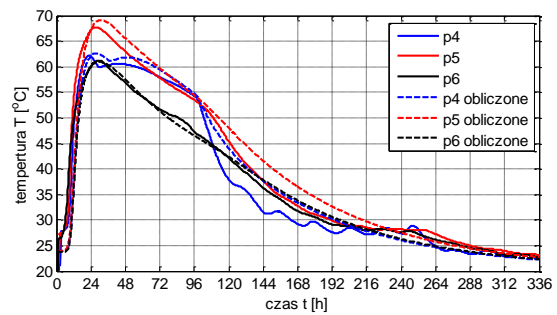
Znajomość pól  $T(x,t)$ ,  $\zeta(x,T,t)$  pozwala na oszacowanie parametrów wytrzymałościowych i sztywnościowych twardniejącego betonu.

Parametry betonu wysokowartościowego C 60/75 przyjęto częściowo z badań laboratoryjnych i literatury [6, 7]. Przykładowe stałe wyznaczone w warunkach adiabatycznych i testach numerycznych zawiera tab. 1.

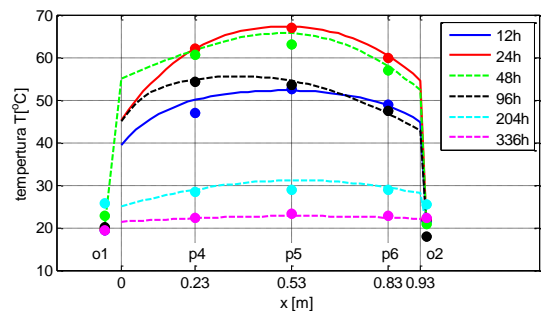
Tabela 1. Parametry materiałowe

| $\zeta_\infty$ | $k/n_0$<br>( $h^{-1}$ )         | $A_0/k$                   | $Q_\infty$<br>( $J/m^3$ ) | $T_0$<br>( $^\circ C$ )     |
|----------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 0,65           | $1,9 \times 10^7$               | $5 \times 10^{-6}$        | $1,95 \times 10^8$        | 24                          |
| $\bar{n}$      | $C$<br>$J/(m^3 \cdot ^\circ C)$ | $E_d/R$<br>( $^\circ K$ ) | $f_\infty$<br>( $MPa$ )   | $T_{ref}$<br>( $^\circ C$ ) |
| 5,5            | $2,16 \times 10^6$              | 4875                      | 75,2                      | 20                          |

Na rys. 3 przedstawiono zmiany temperatury *in situ* i prognozę procesu wydzielania ciepła w punktach p4, p5, p6. Symulacje profili rozkładu temperatury po grubości płyty w godz.: 12, 48, 96, 204, 336 ilustruje rys. 4, na którym wartości pomiarowe oznaczono kropkami.



Rys. 3. Zmiany temperatury, pierwsze 14 dni



Rys. 4. Profile rozkładu temperatury, przekrój B-B

#### 5. Podsumowanie

Wykonawcy konstrukcji betonowych potrzebują informacji o parametrach młodego betonu. W pracy przedstawiono model dojrzewania betonu i jego implementację na przykładzie dolnej płyty mostowego ustroju skrzynkowego. Przeprowadzone badania pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- 1) techniki ciągłego monitorowania temperatury betonu sprzężone z pakietem analitycznym stanowią realne wsparcie przyspieszenia procesu budowlanego,
- 2) zaproponowany model, spójny z pomiarami *in situ*, prognozuje zmianę temperatury, co umożliwia określenie cech wytrzymałościowych i sztywnościowych betonu.

*Dziękujemy firmie Wilde Engineering Sp. z o.o. za udostępnienie sprzętu i wsparcie techniczne w monitorowaniu procesu dojrzewania betonu.*

#### Literatura

- [1] Cervera M., Faria R., Oliver J., Prato T., *Numerical modelling of concrete curing, regarding hydration and temperature phenomena*, Computers and Structures, Vol. 80, pp. 1511–1521, 2002.
- [2] Martinelli E., Koenders E.A.B., Caggiano A., *A numerical recipe for modelling hydration and heat flow in hardening concrete*, Cement & Concrete Composites, Vol. 40, pp. 48–58, 2013.
- [3] Bentz D.P., Waller V., De Larrard F., *Prediction of adiabatic temperature rise in conventional and high-performance concretes using a 3D microstructural model*, Cement Concrete Research, Vol. 28, No. 2, pp. 285–297, 1998.
- [4] Carino N.J., Lew H.S., *The Maturity Method: From Theory to Application*, Proceedings of the Structures Congress & Exposition, Washington, D.C., American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2001.
- [5] Mariak A., Wilde K., *Wykładnicze równanie Arrheniusa jako funkcja dojrzalności twardniejącego betonu*, Dni Betonu, 2016.
- [6] Kim J.-K., Moon Y.-H., Eo S.-H., *Compressive strength development of concrete with different curing time and temperature*, Cement Concrete Research, Vol. 28, No. 2, pp. 1761–1773, 1998.
- [7] De Schutter G., Taerwe L., *General hydration model for Portland cement and blast furnace slag cement*, Cement Concrete Research, Vol. 25, No. 3, pp. 593–604, 1995.