

# Wpływ warunków prowadzenia robót betonowych na ryzyko powstania wczesnych rys termiczno-skurczowych

Dr hab. inż. Barbara Klemczak, mgr inż. Agnieszka Knoppik-Wróbel,  
Politechnika Śląska

## 1. Wprowadzenie

W konstrukcjach betonowych znany jest efekt tzw. samoociepnięcia betonu. Wskutek wydzielanego w procesie hydratacji cementu ciepła następuje wzrost temperatury betonu. Chłodzenie warstw powierzchniowych konstrukcji oraz stosunkowo niska wartość współczynnika przewodnictwa cieplnego powodują zróżnicowanie temperatur pomiędzy warstwami powierzchniowymi a wnętrzem konstrukcji. W tym samym czasie pojawiają się odkształcenia skurczowe, będące skutkiem zachodzących reakcji chemicznych (skurcz chemiczny i autogeniczny) oraz utraty wody z betonu przechowywanego w powietrzu nienasyconym parą wodną (skurcz betonu wysychającego). Powstające nieliniowe i niestacjonarne sprzężone pola termiczno-skurczowe generują w konstrukcji naprężenia własne (związane z więzami wewnętrznymi konstrukcji, które wynikają z nierównomiernego rozgrzania) i naprężenia wymuszone (związane z ograniczeniem swobody odkształceń konstrukcji). Naprężenia te, często o znacznych wartościach, mogą być przyczyną powstawania zarysowań konstrukcji [1, 2, 3].

Ryzyko zarysowania betonu zwiększa się wraz ze wzrostem temperatur twardnienia oraz ze wzrostem różnicy temperatur pomiędzy wnętrzem a powierzchnią. Podejmowane środki zaradcze ograniczające to ryzyko to przede wszystkim zabiegi technologiczne mające na celu obniżenie maksymalnych temperatur twardnienia oraz zmniejszenie wspomnianej różnicy temperatur pomiędzy wnętrzem i powierzchnią elementu. Większość zaleceń w tym zakresie sugeruje, aby różnica ta nie przekraczała  $15 \div 20^\circ\text{C}$ , a maksymalna temperatura, która generowana jest w procesie twardnienia nie była wyższa niż  $65^\circ\text{C}$  [4, 5].

Stosowane są więc cementy o niskim ciepłe uwodnienia, ogranicza się również zawartość cementu w mieszance betonowej. Istotną rolę odgrywają warunki prowadzenia robót betonowych, a więc temperatura początkowa mieszanki betonowej, temperatura otoczenia

oraz wzajemna korelacja tych temperatur. Generalnie, za korzystne warunki betonowania konstrukcji masywnych uważa się niską, ale dodatnią temperaturę otoczenia oraz obniżanie temperatury początkowej mieszanki betonowej w stosunku do temperatury otoczenia [6, 7, 8]. Najczęściej temperaturę mieszanki betonowej obniża się poprzez oziębianie kruszywa i wody zarobowej. Obniżenie temperatury kruszywa uzyskuje się poprzez spryskiwanie zimną wodą, kruszywo drobne może być również chłodzone powietrzem. Schłodzenie wody zarobowej można uzyskać zastępując jej część kruszonym lodem lub płatkami lodu, uzyskując w ten sposób obniżenie temperatury początkowej mieszanki betonowej od  $5^\circ\text{C}$  nawet do  $20^\circ\text{C}$  [4]. Znacznie rzadziej stosowane jest chłodzenie gotowej mieszanki betonowej ciekłym azotem o temperaturze  $-196^\circ\text{C}$ , ze względu na wysokie koszty tej technologii [4].

Temperaturę początkową mieszanki betonowej można ustalić na podstawie temperatury jej składników, według wzoru [4]:

$$T_{\text{initial}} = \frac{0,22 \cdot (T_a \cdot W_a + T_c \cdot W_c) + T_w \cdot W_w}{0,22 \cdot (W_a + W_c) + W_w} \quad (1)$$

gdzie:

$T_{i(i=k,c,w)}$  – temperatura  $i$ -tego składnika mieszanki betonowej,  $^\circ\text{C}$ ,

$W_{i(i=k,c,w)}$  – masa  $i$ -tego składnika na jednostkę objętości betonu,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,

$a, c, w$  – indeksy odnoszące się do kruszywa, wody i cementu.

Przykładowo, dla mieszanki betonowej o zawartości cementu  $350 \text{ kg}/\text{m}^3$ , wody  $175 \text{ l}/\text{m}^3$  oraz zawartości kruszywa  $1814 \text{ kg}/\text{m}^3$  oraz zakładając, że temperatura składników betonu jest równa temperaturze otoczenia  $T_{\text{otoczenia}} = 20^\circ\text{C}$ , możemy otrzymać temperaturę początkową mieszanki  $T_{\text{pocz}}$ :

- przy braku chłodzenia składników betonu

$T_{\text{pocz}} = 20^\circ\text{C}$ ,

- przy schłodzeniu wody zarobowej do temperatury

$T_w = 5^\circ\text{C} \rightarrow T_{\text{pocz}} = 16^\circ\text{C}$ ,

- przy schłodzeniu kruszywa do temperatury  $T_k = 5^\circ\text{C} \rightarrow T_{pocz} = 11^\circ\text{C}$ ,
- przy równoczesnym schłodzeniu wody i kruszywa do temperatury  $T_w = T_k = 5^\circ\text{C} \rightarrow T_{pocz} = 7^\circ\text{C}$ .

Należy jednak pamiętać, że w rzeczywistości temperatura początkowa betonu będzie nieco wyższa od temperatury obliczonej na podstawie wzoru (1), ze względu na pracę mechaniczną wykonaną w trakcie mieszania składników.

Znaczne zmniejszenie różnic temperatur między wnętrzem i powierzchnią można też uzyskać układając izolację termiczną na powierzchniach elementu [9]. Izolacja termiczna ogranicza odprowadzenie ciepła i wilgoci z elementu zmniejszając różnice temperatur, ale jednocześnie wzrasta temperatura wnętrza. Wadą tej metody jest konieczność stosunkowo długiego okresu utrzymywania izolacji na powierzchniach elementu, ponieważ zbyt wczesne jej usunięcie może spowodować powstanie w elemencie jeszcze większych naprężeń niż w przypadku braku izolacji.

W artykule przedstawiono wyniki symulacji komputerowych, w których badano wpływ zróżnicowanych warunków prowadzenia robót betonowych na rozkład temperatur twardnienia betonu, zmian wilgotności i generowanych naprężeń. Analizowano również wpływ dodatkowych zabiegów technologicznych, takich jak stosowanie izolacji termicznej czy też wstępne chłodzenie mieszanki betonowej.

## 2. Założenia i zakres analizy

Analizy numeryczne ilustrujące omawiane zagadnienie wykonano autorskimi programami TEMWIL, MAFEM\_VEP oraz MAFEM3D [8, 10].

Wpływ zróżnicowanych warunków prowadzenia robót betonowych analizowano dla masywnej płyty fundamentowej i ściany żelbetowej. Obliczenia wykonano dla założonych warunków materiałowych i technologicznych. Temperaturę zewnętrzną ( $T_z$ ) przyjęto równą  $15^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$  lub  $25^\circ\text{C}$ . Podstawowym założeniem było, że temperatura początkowa ( $T_p$ ) mieszanki betonowej jest równa temperaturze zewnętrznej. Dodatkowo uwzględniono wpływ wstępnego schłodzenia mieszanki betonowej o  $5^\circ\text{C}$  i  $10^\circ\text{C}$  w stosunku do temperatury otoczenia oraz zabezpieczenie powierzchni elementów izolacją termiczną. W przypadku płyty fundamentowej przyjęto, że izolacja ułożona na górnej powierzchni płyty utrzymywana jest przez 7 dni lub cały analizowany okres (20 dni). Dla ściany żelbetowej izolacja została przyjęta na powierzchniach bocznych przez cały analizowany okres. W pozostałych przypadkach (elementy bez izolacji termicznej) przyjęto, że górna powierzchnia jest odkryta, a na powierzchniach bocznych ułożone jest deskowanie grubości 1,8 cm. Współczynniki termiczno-wilgotnościowe przyjęte w obliczeniach zestawiono w tabeli 1.

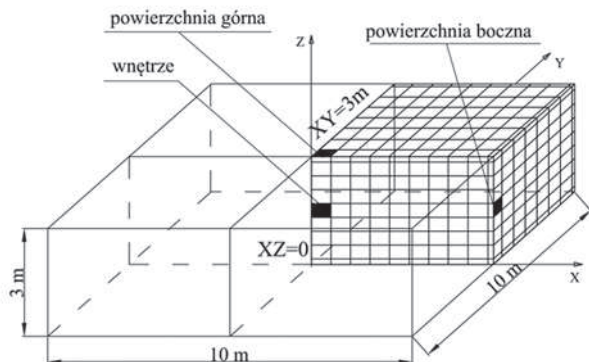
Przyjęto, że analizowane elementy zostały wykonane z betonu o następującym składzie: cement CEM II/BS 32,5R (płyta), CEM I 32,5R (ściana) –  $350 \text{ kg/m}^3$ , woda –  $175 \text{ l/m}^3$ , kruszywo –  $1814 \text{ kg/m}^3$ . Rozwój właściwości mechanicznych betonu określono zgodnie z modelem CEB-FIP MC90 [11]. Dla betonu 28-dniowego przyjęto następujące wartości: wytrzymałość na ściskanie  $f_{cm} = 32,4 \text{ MPa}$ , wytrzymałość na rozciąganie  $f_{ctm} = 3,0 \text{ MPa}$ , moduł sprężystości  $E_{cm} = 32 \text{ GPa}$ .

Wpływ warunków prowadzenia robót betonowych analizowano dla dwóch typów konstrukcji: masywnej płyty fundamentowej oraz ściany żelbetowej. Symetria zagad-

**Tabela 1.** Współczynniki termiczno-wilgotnościowe

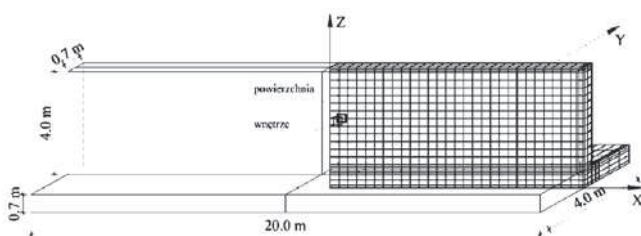
| Pola termiczne  |  |  |
|---|--|--|
| Współczynnik przewodnictwa ciepła                                       | $\lambda$ , W/mK   | 1,75   |
| Ciepło właściwe   | $c_p$ , kJ/kgK   | 1,0  |
| Gęstość betonu  | $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>   | 2340   |
| Współczynnik wyrównywania temperatury                                   | $\alpha_{TT}$ , m <sup>2</sup> /s                                    | $7,47 \cdot 10^{-7}$   |
| Współczynnik uwzględniający wpływ zmian stężenia wilgoci na ruch ciepła | $\alpha_{TW}$ , m <sup>2</sup> K/s                                   | $9,375 \cdot 10^{-5}$  |
| Współczynnik wymiany ciepła z otoczeniem                                | $\alpha_p$ , W/m <sup>2</sup> K                                      | 6,00 (powierzchnia odkryta)<br>3,58 (powierzchnia z deskowaniem)<br>0,66 (powierzchnia z izolacją)<br>0,81 (powierzchnia dolna, kontakt z gruntem)   |
| Ciepło hydratacji   | zgodnie z równaniem:<br>$Q(T, t) = Q_\infty e^{[-at_\infty^{-0,5}]}$ | dla płyty: $Q_\infty = 350 \text{ kJ/kg}$ $a=200$<br>dla ściany: $Q_\infty = 420 \text{ kJ/kg}$ $a=170$  |
| Pola wilgotności  |  |  |
| Współczynnik proporcjonalności cieplno-wodnej cementu                   | $K$ , m <sup>3</sup> /J  | $0,3 \cdot 10^{-9}$  |
| Współczynnik dyfuzji wilgoci  | $\alpha_{WW}$ , m <sup>2</sup> /s                                    | $0,6 \cdot 10^{-9}$  |
| Termiczny współczynnik dyfuzji wilgoci                                  | $\alpha_{WT}$ , m <sup>2</sup> /sK                                   | $2 \cdot 10^{-11}$   |
| Współczynnik wymiany wilgoci z otoczeniem                               | $\beta_p$ , m/s  | $2,78 \cdot 10^{-8}$ (powierzchnia odkryta)<br>$0,18 \cdot 10^{-8}$ (powierzchnia z deskowaniem)<br>$0,08 \cdot 10^{-8}$ (powierzchnia z izolacją)<br>$0,12 \cdot 10^{-8}$ (powierzchnia dolna, kontakt z gruntem) |

nienia pozwoliła na ograniczenie analizy do  $\frac{1}{4}$  elementu. Dla płyty fundamentowej przyjęto wymiary podstawy 10 x 10 m i grubość 3 m (rys. 1). Zbrojenie płyty stanowiła siatka powierzchniowa z prętów o średnicy 12 mm w rozstawie 20 x 20 cm (stal RB400).



Rys. 1. Wymiary analizowanej płyty fundamentowej

Dla ściany żelbetowej przyjęto wymiary: długość 20 m, wysokość 4 m i grubość 70 cm (rys. 2). Założono, że ściana została wykonana na wcześniej betonowanym fundamencie grubości 70 cm i szerokości 4 m. Uwzględniono zbrojenie ściany w postaci siatki powierzchniowej z prętów  $\varnothing 16$  w rozstawie poziomym 20 cm i pionowym 15 cm oraz zbrojenie fundamentu w postaci siatki prętów o oczkach 20 x 20 cm (stal RB400).

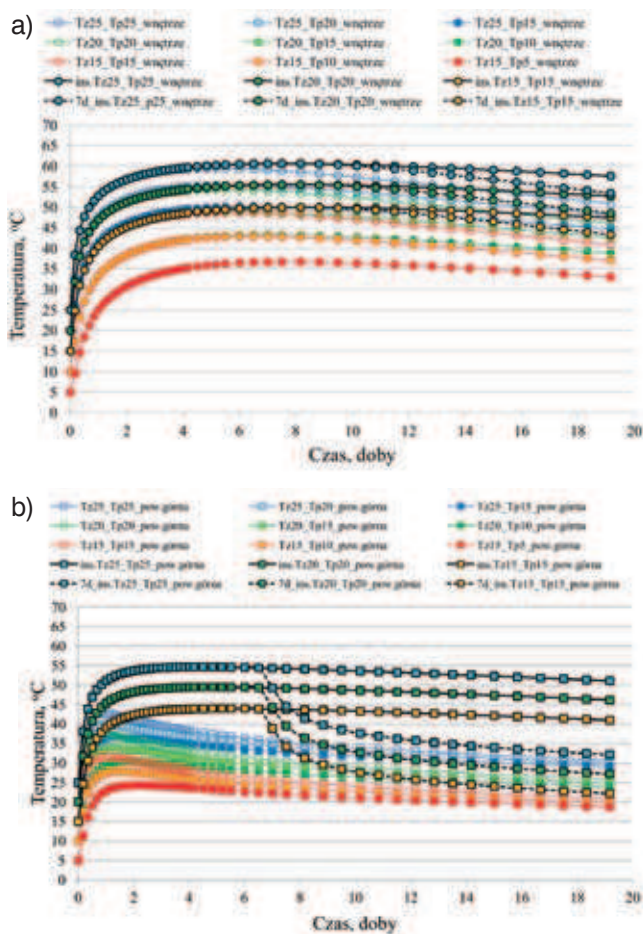


Rys. 2. Wymiary analizowanej ściany żelbetowej

### 3. Wyniki analiz

#### 3.1. Masywna płyta fundamentowa

Rozwój temperatur twardnienia we wnętrzu oraz na powierzchni płyty fundamentowej dla zróżnicowanych warunków prowadzenia robót betonowych pokazano na rysunku 3. Można zauważyć, że warunki prowadzenia robót betonowych mają istotny wpływ na wartości temperatur generowanych w trakcie twardnienia betonu. Widoczny jest szczególnie korzystny wpływ wstępnego schłodzenia mieszanki betonowej na rozkład temperatur twardnienia płyty. W tym przypadku zmniejszona została maksymalna temperatura wnętrza płyty – schłodzenie mieszanki o 5°C (Tz15Tp10, Tz20Tp15, Tz25Tp20) obniżyło temperatury twardnienia wnętrza o odpowiednio



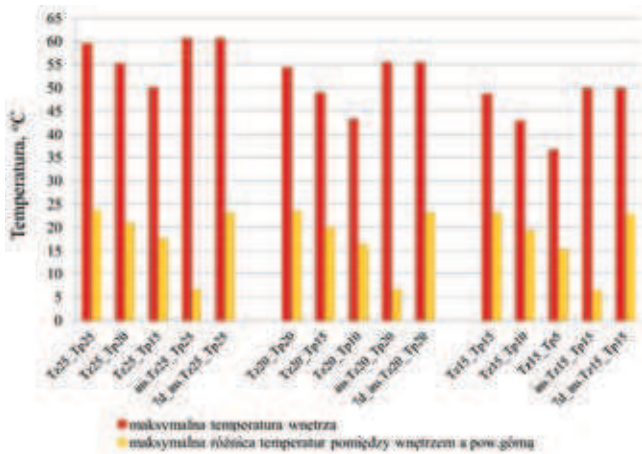
Rys. 3. Rozwój temperatur twardnienia w płycie fundamentowej dla zróżnicowanych warunków prowadzenia robót betonowych: a) wnętrze płyty, b) powierzchnia górna płyty

5,8°C, 5,3°C i 4,3°C w płytach dojrzewających przy temperaturach zewnętrznych 15°C, 20°C i 25°C. Schłodzenie mieszanki betonowej o 10°C (Tz15Tp5, Tz20Tp10, Tz25Tp15) zredukowało temperatury wnętrza o odpowiednio 12,0°C, 11,1°C i 9,4°C. Mniejsze są również w tym przypadku różnice temperatur pomiędzy wnętrzem płyty a powierzchnią górną (rys. 4).

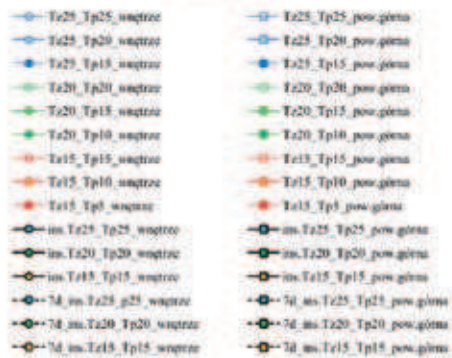
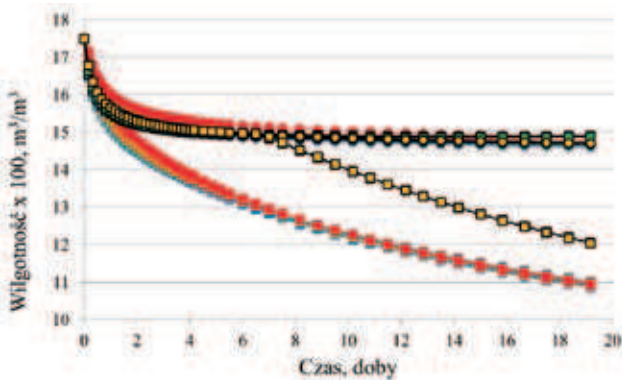
Ułożenie na górnej powierzchni płyty izolacji termicznej powoduje podniesienie maksymalnej temperatury wnętrza płyty zaledwie o 1°C (ins.Tz15Tp15, ins.Tz20Tp20, ins.Tz25Tp25) w stosunku do płyt bez izolacji (Tz15Tp15, Tz20Tp20, Tz25Tp25). Znacznie zmniejszona jest natomiast różnica temperatur pomiędzy wnętrzem płyty a powierzchnią górną (rys. 4). Przykładowo, dla płyty z izolacją (ins.Tz25Tp25) różnica ta wynosi 6,8°C w porównaniu z wartością 23,6°C dla płyty bez izolacji (Tz25Tp25). Warto zauważyć, że usunięcie izolacji w 7 dobie po zabetonowaniu płyty (7d\_ins.Tz15Tp15, 7d\_ins.Tz20Tp20, 7d\_ins.Tz25Tp25) powoduje wzrost różnicy temperatur pomiędzy wnętrzem a powierzchnią górną do 23,1°C (7d\_ins.Tz25Tp25), a więc do niemal identycznej wartości jak dla płyty bez izolacji termicznej.

Przy braku dodatkowych zabiegów technologicznych w postaci wstępnego chłodzenia mieszanki betonowej





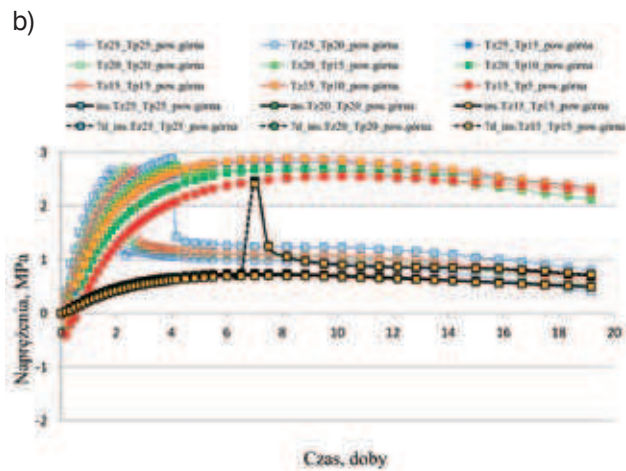
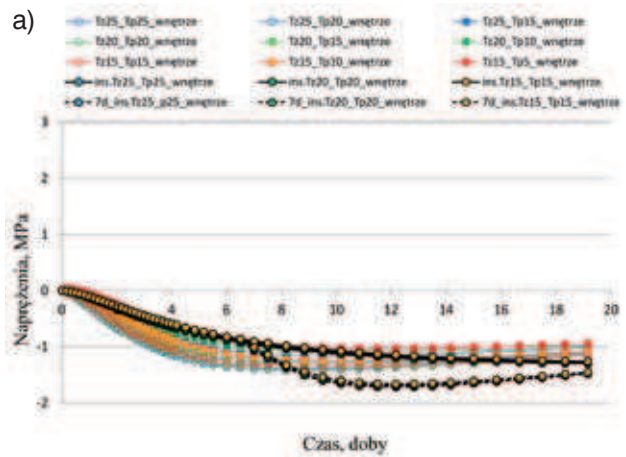
**Rys. 4.** Porównanie maksymalnych temperatur twardnienia oraz maksymalnych różnic temperatury pomiędzy wnętrzem a powierzchnią płyty fundamentowej dla zróżnicowanych warunków prowadzenia robót betonowych



**Rys. 5.** Zmiany wilgotności w płycie fundamentowej dla zróżnicowanych warunków prowadzenia robót betonowych

czy też ułożenia izolacji termicznej na górnej powierzchni, najmniejsze temperatury wnętrza wystąpiły dla płyty betonowanej przy temperaturze zewnętrznej i początkowej 15°C (Tz15Tp15).

Zmiany wilgotności we wnętrzu oraz na powierzchni górnej płyt widoczne są na rysunku 5. Niezależnie od warunków prowadzenia robót betonowych i dodatkowych zabiegów technologicznych, zmiany wilgotności we wnętrzu płyty są podobne. Przy braku zabezpieczenia powierzchni górnej dodatkową izolacją podobny jest również charakter zmian wilgotności na tej powierzchni, niezależnie od wartości temperatury zewnętrznej i temperatury początkowej. Ułożenie

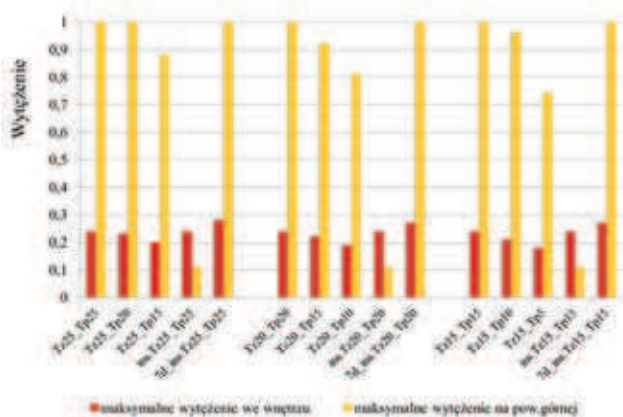


**Rys. 6.** Rozwój naprężeń termiczno-skurczowych w płycie fundamentowej dla zróżnicowanych warunków prowadzenia robót betonowych: a) wnętrze, b) powierzchnia górna

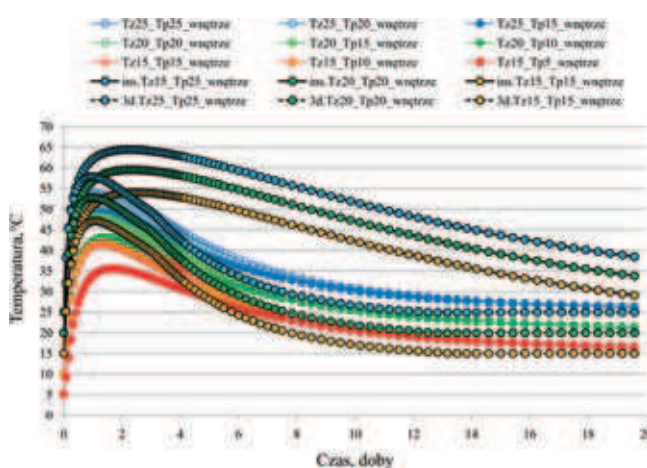
izolacji termicznej na powierzchni redukuje znacznie odpływ wilgoci z powierzchni górnej, znaczny ubytek wilgoci jest obserwowany dopiero po usunięciu izolacji (7d\_ins.Tz15Tp15, 7d\_ins.Tz20Tp20, 7d\_ins.Tz25Tp25).

Rozwój naprężeń termiczno-skurczowych  $\sigma_x$  we wnętrzu i na powierzchni płyty przedstawiono na rysunku 6. Naprężenia ściskające we wnętrzu płyty, niezależnie od zadanych warunków technologicznych, są na podobnym poziomie (rys. 6a). Widoczne są natomiast różnice w wartościach naprężeń rozciągających generowanych na powierzchni górnej (rys. 6b). Największe naprężenia rozciągające wystąpiły w przypadku braku wstępnego chłodzenia mieszanki betonowej i braku zabezpieczenia powierzchni górnej płyty izolacją termiczną (Tz15Tp15, Tz20Tp20, Tz25Tp25). W tym przypadku nastąpiło zarysowanie powierzchni górnej płyt – na rysunku 6b jest to widoczne w postaci nagłego spadku naprężeń. Wytężenie powierzchni górnej jest w takim przypadku równe 1 – co jest jednoznaczne z wejściem ścieżki naprężenia na powierzchnię zniszczenia i zarysowania (rys. 7).

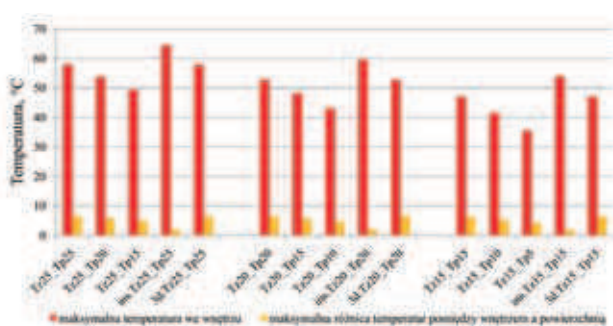
Zastosowanie wstępnego chłodzenia mieszanki betonowej wpływa korzystnie na wytężenie powierzchni górnej. W analizowanych przypadkach wstępnego schłodzenia mieszanki betonowej o 5°C i 10°C (Tz15Tp10,



**Rys. 7.** Wytyczenie powierzchni górnej płyty fundamentowej dla zróżnicowanych warunków prowadzenia robót betonowych



**Rys. 8.** Rozwój temperatur twardnienia w ścianie żelbetowej dla zróżnicowanych warunków prowadzenia robót betonowych



**Rys. 9.** Porównanie maksymalnych temperatur twardnienia oraz maksymalnych różnic temperatury pomiędzy wnętrzem a powierzchnią ściany żelbetowej dla zróżnicowanych warunków prowadzenia robót betonowych

Tz20Tp15, Tz25Tp20, Tz15Tp5, Tz20Tp10, Tz25Tp15) obserwowano znaczne zmniejszenie poziomu wytyczenia górnej powierzchni płyty (rys. 7). Poza przypadkiem płyty Tz25Tp20, nie wystąpiło również zarysowanie górnej powierzchni. Najmniejsze wytyczenie górnej

powierzchni płyty fundamentowej można zaobserwować przy zastosowaniu izolacji termicznej górnej powierzchni (ins.Tz15Tp15, ins.Tz20Tp20, ins.Tz25Tp25). Usunięcie izolacji termicznej z górnej powierzchni płyty w 7 dobie po zabetonowaniu spowodowało gwałtowny wzrost naprężeń rozciągających (rys. 6b) i zarysowanie powierzchni płyty (rys. 7).

### 3.2. Ściana żelbetowa

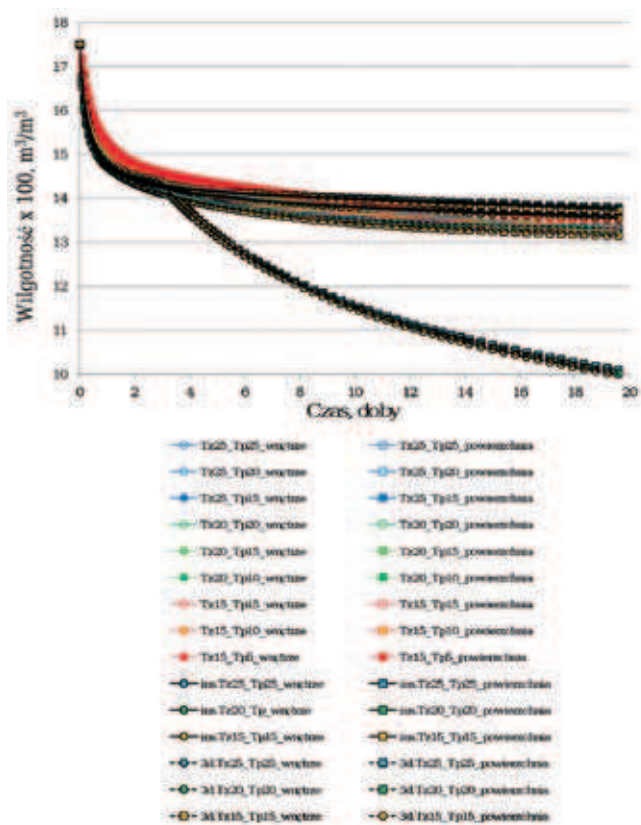
Rysunek 8 przedstawia wykresy rozwoju temperatur w czasie dla analizowanej ściany z uwzględnieniem zróżnicowanych warunków betonowania. Najwyższe temperatury twardnienia wystąpiły w ścianach, w których zastosowano izolację termiczną (rys. 9); były to odpowiednio wartości 54,1°C, 59,6°C i 64,5°C dla ścian ins.Tz15Tp15, ins.Tz20Tp20 i ins.Tz25Tp25 w porównaniu do wartości 47,1°C, 52,8°C i 57,9°C dla ścian, w których izolacja nie została zastosowana (Tz15Tp15, Tz20Tp20, Tz25Tp25). Wstępne schłodzenie mieszanki betonowej o 5°C (Tz15Tp10, Tz20Tp15, Tz25Tp20) obniżyło temperatury twardnienia o odpowiednio 5,5°C, 4,6°C i 4,1°C w ścianach dojrzewających przy temperaturach zewnętrznych 15°C, 20°C i 25°C. Schłodzenie mieszanki betonowej o 10°C (Tz15Tp5, Tz20Tp10, Tz25Tp15) zaowocowało redukcją temperatur o odpowiednio 11,5°C, 9,7°C i 8,5°C.

Różnica temperatur na grubości ściany w przypadku ścian utrzymanych w deskowaniu z izolacją (ins.Tz15Tp15, ins.Tz20Tp20, ins.Tz25Tp25) jest niezauważalna (mniej niż 2°C). Rezygnacja z izolacji i utrzymywanie ściany tylko w deskowaniu (Tz15Tp15, Tz20Tp20, Tz25Tp25) spowodowało zróżnicowanie temperatur także w przekroju ściany – w takim przypadku maksymalna różnica temperatur pomiędzy wnętrzem a powierzchnią boczną ściany wyniosła 6,5°C. Usunięcie deskowania we wczesnej fazie twardnienia betonu, po trzecim dniu od zabetonowania ściany, nie miało wpływu na wartość maksymalnej temperatury twardnienia, ponieważ ta we wszystkich przypadkach (3d.Tz15Tp15, 3d.Tz20Tp20, 3d.Tz25Tp25) została osiągnięta w pierwszej dobie. Natomiast bezpośrednio po rozdeskowaniu zaobserwowano nagły wzrost tempa chłodzenia ściany, szczególnie w jej strefach przypowierzchniowych.

Zmiany wilgotności we wnętrzu oraz na powierzchni ścian w czasie twardnienia betonu przedstawiono na rysunku 10. Dla ścian utrzymanych w deskowaniu lub w deskowaniu z izolacją, widoczny jest podobny rozkład zmian wilgotności, zarówno we wnętrzu ściany, jak i w strefach powierzchniowych. Skutkiem usunięcia deskowania w 3 dobie po zabetonowaniu jest nagły odpływ wilgoci ze stref powierzchniowych ścian (3d.Tz15Tp15, 3d.Tz20Tp20, 3d.Tz25Tp25).

Rysunek 11 przedstawia wykresy rozwoju naprężeń termiczno-skurczowych  $\sigma_x$  w czasie twardnienia betonu ściany, natomiast rysunek 12 wytyczenie wybranych punktów ściany z uwzględnieniem zróżnicowanych warunków betonowania i dojrzewania. Zastosowanie wstępnego chłodzenia mieszanki betonowej (Tz15Tp10, Tz20Tp15,



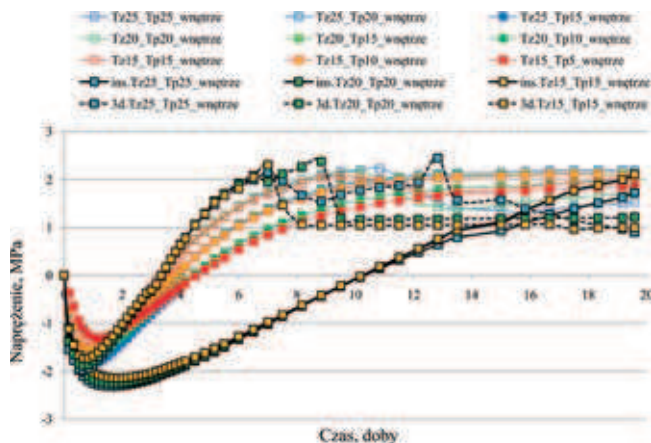


**Rys. 10.** Zmiany wilgotności w ścianie żelbetowej dla różnicowanych warunków prowadzenia robót betonowych

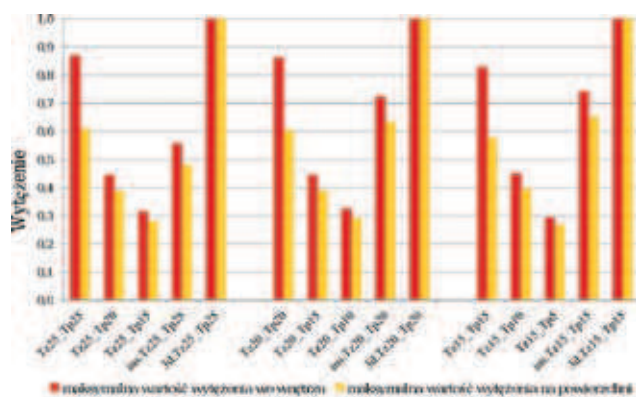
Tz25Tp20, Tz15Tp5, Tz20Tp10, Tz25Tp15) miało pozytywny wpływ na rozwój naprężeń we wszystkich analizowanych przypadkach. Wartości naprężeń ściskających (powstających w fazie wzrostu temperatury) i naprężeń rozciągających (powstających w fazie spadku temperatury) uległy obniżeniu. Również czas pojawienia się naprężeń rozciągających został opóźniony. W rezultacie obniżone zostało ryzyko zarysowania ściany (rys. 12).

W ścianach, w których zastosowano dodatkową izolację termiczną, naprężenia ściskające osiągnęły największe wartości (2,1 MPa, 2,2 MPa i 2,3 MPa odpowiednio dla ścian ins.Tz15Tp15, ins.Tz20Tp20 i ins.Tz25Tp25). Bardzo późno nastąpiła w tym przypadku inwersja bryły naprężeń – dopiero po upływie 10,5 doby od zabetonowania ściany. Wyężenie na powierzchni/we wnętrzu tych ścian przy temperaturach 15°C, 20°C i 25°C wyniosło odpowiednio 0,48/0,56, 0,29/0,33 i 0,27/0,29 w porównaniu do wyężenia na poziomie 0,61/0,87, 0,60/0,86 i 0,57/0,83 w przypadku ścian, w deskowaniu których nie zastosowano izolacji (rys. 12).

Wczesne usunięcie deskowania ściany (3d.Tz15Tp15, 3d.Tz20Tp20, 3d.Tz25Tp25) przyspieszyło rozwój naprężeń rozciągających, co w połączeniu z niską wytrzymałością na rozciąganie w tak wczesnej fazie twardnienia betonu skutkowało zarysowaniem ściany. Widoczne jest to na rysunku 11 w postaci nagłego spadku naprężeń rozciągających oraz na rysunku 12, gdzie dla tych przypadków wyężenie jest równe 1.



**Rys. 11.** Rozwój naprężeń termiczno-skurczowych w ścianie żelbetowej dla różnicowanych warunków prowadzenia robót betonowych



**Rys. 12.** Wyężenie ściany żelbetowej dla różnicowanych warunków prowadzenia robót betonowych

#### 4. Podsumowanie

Problem powstawania wczesnych rys termiczno-skurczowych w konstrukcjach betonowych jest znany od lat trzydziestych ubiegłego stulecia, kiedy to nastąpił rozwój budownictwa hydrotechnicznego w Stanach Zjednoczonych. Pomimo ponad 80-letniej obecności omawianej problematyki w literaturze technicznej, opracowanie skutecznych metod ograniczania ryzyka zarysowania we wczesnym okresie dojrzewania betonu nadal należy do istotnych zadań inżynierskich. Jest to jednak zadanie stosunkowo trudne, ze względu na znaczną liczbę czynników decydujących o wielkości i charakterze wczesnych zmian termiczno-skurczowych. Poza tak istotnymi czynnikami, jak ilość i typ zastosowanego cementu, wymiary i geometria konstrukcji, duże znaczenie mają warunki prowadzenia robót betonowych.

Analizy przedstawione w artykule, w których badano wpływ warunków prowadzenia robót betonowych, wykonano dla założonego składu mieszanki betonowej i warunków wymiany ciepła z otoczeniem. Wyniki ilościowe można więc odnosić do tych założeń, jednak stosunkowo szeroki zakres obliczeń pozwala jednak na sformułowanie pewnych wniosków jakościowych.

Wyniki analiz potwierdziły, że betonowanie konstrukcji podatnych na ryzyko powstania wczesnych rys termiczno-skurczowych [2] powinno być prowadzone przy możliwie niskiej temperaturze zewnętrznej. Również obniżanie temperatury początkowej mieszanki betonowej poprzez wstępne schłodzenie jej składników jest korzystne ze względu na zmniejszenie wartości generowanych temperatur twardnienia i ich gradientów, a w konsekwencji redukcję naprężeń rozciągających i ryzyka zarysowania konstrukcji. Znaczne zmniejszenie różnic temperatur między wnętrzem i powierzchnią można też uzyskać układając izolację termiczną na powierzchniach elementu. Ograniczone jest wtedy odprowadzenie ciepła i wilgoci z elementu, co zmniejsza różnice temperatur pomiędzy wnętrzem a powierzchnią. Istotną wadą stosowania izolacji termicznej jest konieczność stosunkowo długiego okresu jej utrzymywania na powierzchniach elementu, ponieważ zbyt wczesne jej usunięcie może spowodować powstanie w elemencie jeszcze większych naprężeń niż w przypadku braku izolacji.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Flaga K., Furtak K., Problem of thermal and shrinkage cracking in tanks vertical walls and retaining walls near their contact with solid foundation slabs, *Architecture-Civil Engineering-Environment*, Vol. 2, No. 2, 2009, s. 23-30  
 [2] Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A., Głuszak B., Destrukcyjna termiczna zbiorników żelbetonowych we wczesnym okresie. XXXIX Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB Krynica 1993, Vol. 5, s. 5-12  
 [3] Klemczak B., Knoppik-Wróbel A., Early age thermal and shrinkage

- cracks in concrete structures – description of the problem, *Architecture-Civil Engineering-Environment*, Vol. 4, No. 2, 2011, s. 35-48  
 [4] Neville A.M., Właściwości betonu, *Polski Cement*, 2000  
 [5] ACI Committee No 207.2R, Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 87, No. 3, 1990, s. 271-295  
 [6] Kiernożycki W., *Betonowe konstrukcje masywne*, Polski Cement, Kraków 2003  
 [7] Klemczak B., O wpływie warunków prowadzenia robót betonowych na temperatury twardnienia betonu w konstrukcjach masywnych, *Inżynieria i Budownictwo*, No. 4, 2006, s. 203-205  
 [8] Klemczak B., Prediction of Coupled Heat and Moisture Transfer in Early-Age Massive Concrete Structures. *Numerical Heat Transfer. Part A: Applications*, Vol. 60, No. 3, 2011, s. 212-233  
 [9] Czkwianianc A., Pawlica J., Maćkowiak Z., Saferna M., Betonowanie masywnego fundamentu o objętości 7400 m<sup>3</sup>, *Konferencja Dni Betonu*, Polski Cement, Szczyrk, 8-10 październik 2002, s. 607-618  
 [10] Klemczak B., Modelowanie efektów termiczno-wilgotnościowych i mechanicznych w betonowych konstrukcjach masywnych, *Monografia 183*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2008  
 [11] CEB-FIP; CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford, 1991  
 [12] RILEM TC 119-TCE; Avoidance of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages. *Materials and Structures*, Vol. 30, October 1997, s. 451-464  
 [13] RILEM REPORT 25; Early age Cracking in Cementitious Systems. Final Report of RILEM Technical Committee TC 181-EAS, 2002  
 [14] Mihashi H., Leite J. P., State-of-the-Art Report on Control Cracking in Early Age Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 2, No. 2, 2004, s. 141-154  
 [15] Klemczak B., Knoppik-Wróbel A., Early age thermal and shrinkage cracks in concrete structures – influence of curing conditions, *Architecture-Civil Engineering-Environment*, Vol. 4, No. 4, 2011, s. 46-55

Artykuł został przygotowany w ramach projektu N N506 043440 pt. „Numeryczna ocena ryzyka zarysowania i metod jego ograniczenia w konstrukcjach masywnych i średniomasywnych”, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki. Zagadnienia prezentowane w artykule w szerszym zakresie zostały przedstawione w numerze 4/2011 czasopisma ACEE [15].

**OGÓLNOPOLSKIE TARGI BUDOWLANE**  
**MUREXPO**  
 oraz **Targi Wyposażenia Wnętrz**  
**MODNE WNĘTRZE**  
**12-14 kwietnia**  
**Warszawa, Torwar**  
 tel.: 22 829 66 33, [www.targibudowlane.pl](http://www.targibudowlane.pl)

organizator **murator EXPO** patron medialny **murator** **Wnętrze Mieszkanie budnet.pl** **VOX**