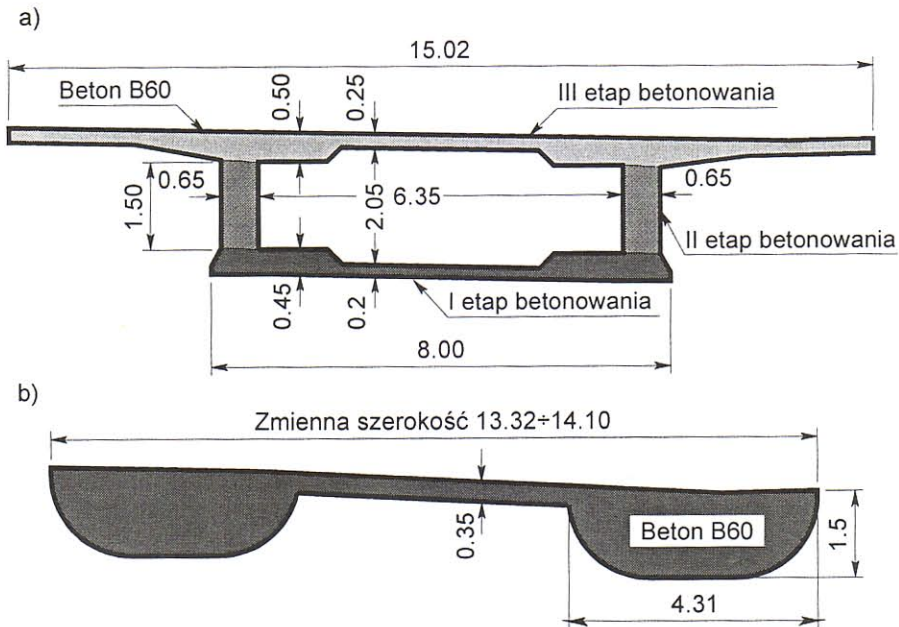


## ROZKŁAD TEMPERATURY TWARDNIENIA BETONU W MASYWNYCH ELEMENTACH MOSTÓW BETONOWYCH

### 1. Wprowadzenie

Ważnym zagadnieniem w technologii betonowania masywnych elementów betonowych jest ograniczenie różnic temperatury powstających w wyniku procesu hydratacji cementu między poszczególnymi warstwami wykonywanych elementów. Problem ten był przedmiotem wielu prac np. [1÷15]. Jednak zebrane dane eksperymentalne nie są w pełni wystarczające do identyfikacji modeli teoretycznych zjawiska, szczególnie w wypadku betonów wysokowartościowych.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań rozkładów temperatur w początkowym okresie twardnienia betonu, uzyskane w rzeczywistych elementach obiektu mostowego. Badania przeprowadzono na budowie estakady w ciągu obwodnicy śródmiejskiej Wrocławia. Jest to obiekt złożony z dwóch niezależnych ciągłych 15-przęsłowych konstrukcji z betonu sprężonego (por. rys. 1a).



Rys. 1. Przekroje poprzeczne poszczególnych elementów obiektu:  
a) przęsło estakady głównej,  
b) przęsło łącznicy dojazdowej

<sup>1</sup> Mgr inż., doktorant Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, Zakład Mostów

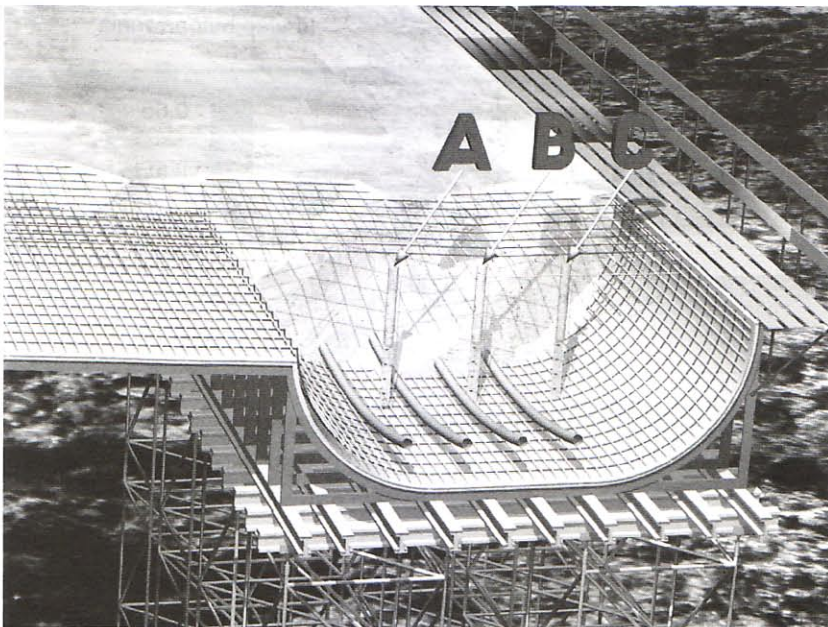
Do każdej z głównych estakad „wnikają” łącznice zapewniające komunikację z otaczającym obszarem miejskim (por. rys. 1b). Obiekt jest wykonany metodą nasuwania podłużnego i betonowania na rusztowaniach. Estakady główne mają przekrój poprzeczny skrzynkowy, a łącznice płytowo-żebrowy. Do wykonania przęseł estakady głównej oraz łącznicy dojazdowej zastosowano beton klasy B60 wykonany według receptur podanej w tablicy 1.

Tablica 1. Receptura betonu klasy B60 użyta do budowy przęseł estakady we Wrocławiu

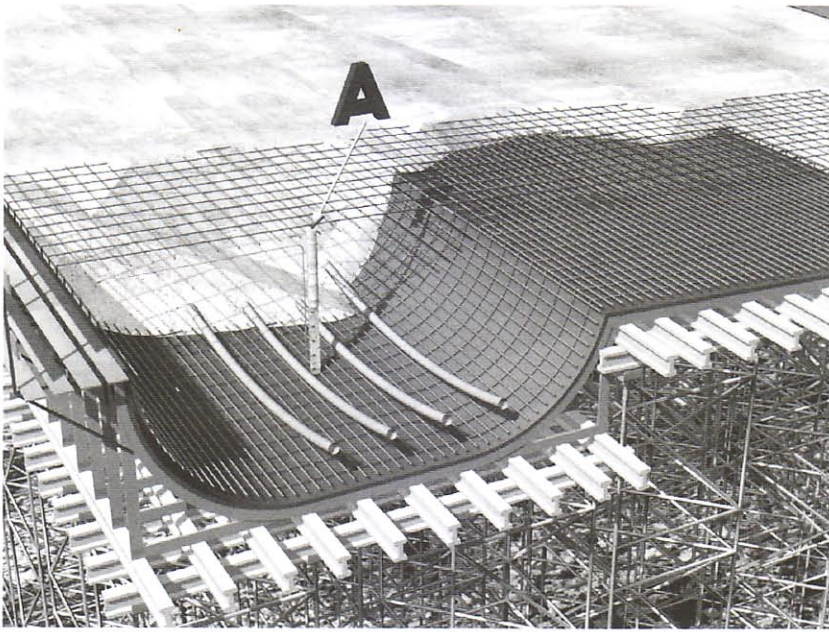
Klasa Betonu	B 60
Cement CEM I MSR NA 42.5 WARTA	420,00 kg/m <sup>3</sup>
Woda	155,00 kg/m <sup>3</sup>
Piasek 0/2 mm	687,00 kg/m <sup>3</sup>
Grys bazaltowy 5/8 mm	481 kg/m <sup>3</sup>
Grys bazaltowy 11/16 mm	763 kg/m <sup>3</sup>
Superplastyfikator ViscoCrete 5	0,9% m.c.=3,78 kg/m <sup>3</sup>
Mikrokrzemionka	18,0 kg/m <sup>3</sup>
Wymagania dodatkowe	F150, W8
Masę kruszywa i mikrokrzemionki podano w stanie powietrzno suchym.	

## 2. Opis badań

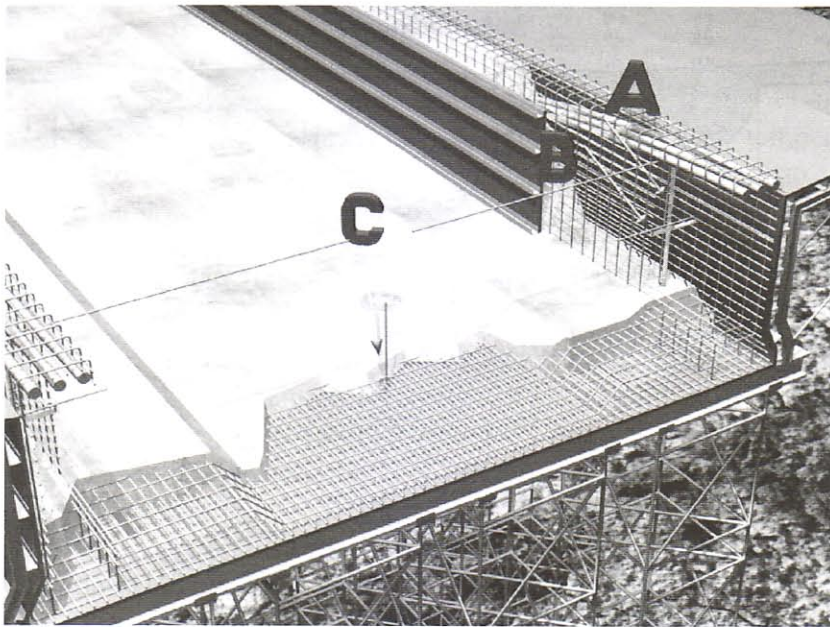
Przedmiotem badań przeprowadzonych na elementach estakady drogowej w ciągu obwodnicy śródmiejskiej jest pomiar temperatury wewnętrznej elementów konstrukcji, wywołanej ciepłem hydratacji w twardniejącym betonie. Dla celów badawczych wybrano trzy elementy, przęsło łącznicy dojazdowej wschodniej i zachodniej składającej się z dwóch masywnych dźwigarów z betonu sprężonego (por. rys. 2, 3) oraz środniki przęsła estakady głównej (por. rys. 4).



Rys. 2. Układ listew pomiarowych w przęśle łącznicy dojazdowej zachodniej



Rys. 3. Układ listwy pomiarowych w przęśle łącznicy dojazdowej wschodniej



Rys. 4. Układ listw pomiarowych w środku przęśla estakady głównej

Badania rozpoczęto w dniu 6 lipca 2001 na przęśle łącznicy dojazdowej zachodniej, następnie w środkach przęśla estakady głównej w dniu 27 października 2001 oraz w przęśle łącznicy dojazdowej wschodniej dnia 27 marca 2002. Przewidywany czas pomiaru od chwili wbudowania betonu do każdego z elementów wynosił pełne siedem dni (168 h). Pomiary wykonywano co godzinę przez pierwsze 12 h a następnie, co 12 h od ostatniego pomiaru aż do pełnych 168 h. Do pomiaru temperatury wewnętrznej użyto czujników termiczny typu PT 100 umieszczonych bezpośrednio w listwach pomiarowych oraz zestawu pomiarowego UPM 60 firmy Hottingr Baldwin Messtechnik (por. rys. 5).



Temperaturę zewnętrzną mierzono termometrem elektronicznym ręcznym. Różnica w próbnym pomiarze temperatury między czujnikami a termometrem wynosiła  $1,5^{\circ}\text{C}$ , a odchyłka temperatury między czujnikami dochodziła do  $1^{\circ}\text{C}$ . W celu właściwego rozmieszczenia czujników w badanym elemencie oraz ich zabezpieczenia przed uszkodzeniem w trakcie betonowania wykonano listwy pomiarowe z betonu przygotowanego według receptury mieszanki betonowej wbudowanej w badany element (por. tablica 1). Wykonanie listwy polegało na umieszczeniu betonu w formie plastikowej i właściwym zagęszczeniu mieszanki. Do tak wykonanej listwy wprowadzono czujniki, równomiernie rozmieszczając je na długości listwy. W każdej listwie umieszczono 10 czujników typu PT 100. W dalszym etapie listwy poddano dwutygodniowej pielęgnacji wilgotnościowej w celu uzyskania odpowiednich parametrów wytrzymałościowych betonu. W przęsłach łącznicy dojazdowej zachodniej i wschodniej listwy pomiarowe umieszczono pionowo w środku dźwigara z tym że dla przęsła łącznicy zachodniej wprowadzono dwie dodatkowe listwy pionowe oddalone od listwy środkowej o 1.20m na zewnątrz i w głąb przęsła (por. rys. 6a,b). Do pomiaru temperatury twardnienia betonu w środkach estakady głównej wykorzystano pojedynczą listwę pionową ustawioną w środku środka oraz pojedynczą listwę poziomą ustawioną na środku wysokości betonowanego środka (por. rys. 6c).

W każdym elemencie zbadano temperaturę wbudowywanego betonu, temperaturę początkową deskowania oraz temperaturę otoczenia podczas betonowania.

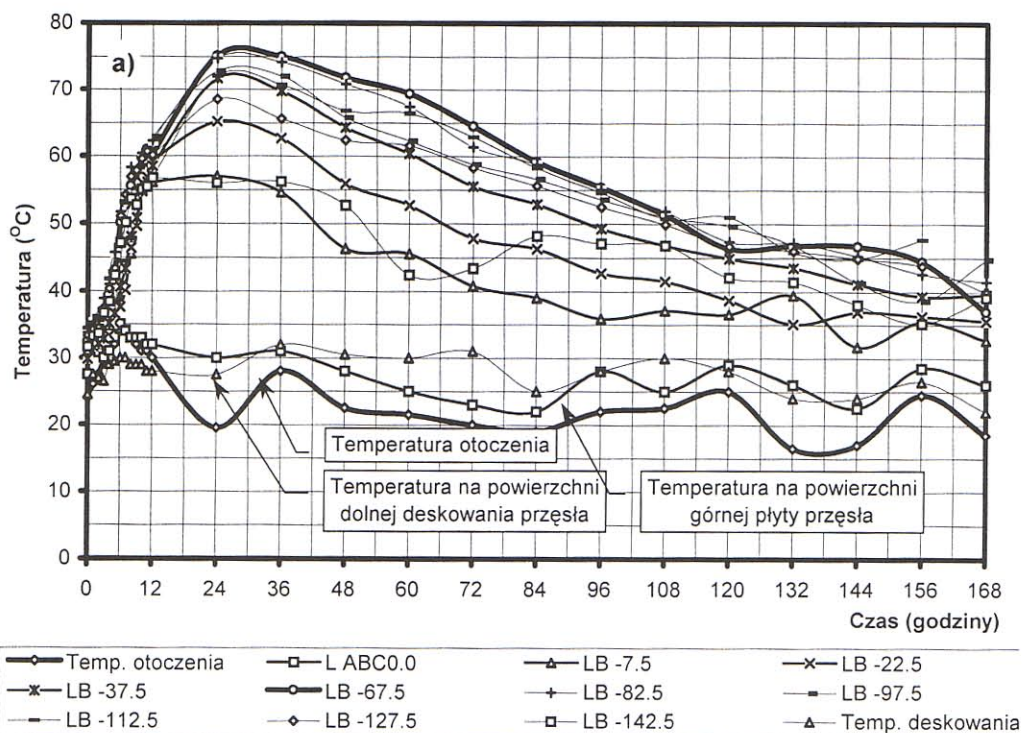
### 3. Wyniki badań

a) Rozkład temperatur w przęśle łącznicy zachodniej.

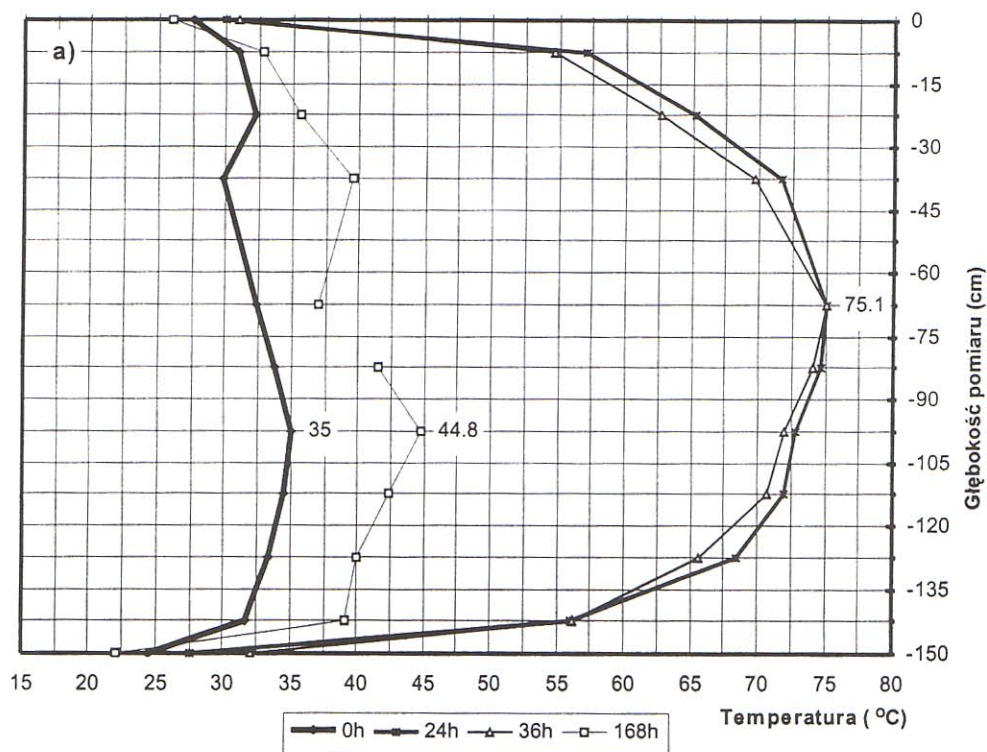
Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów temperatur w środku rozpiętości przęsła łącznicy dojazdowej zachodniej. Pomiar wykonano na wysokości dźwigara, ustawiając pionowo listwę B w osi dźwigara oraz listwy A i C z przesunięciem o 1.2 m w kierunku zachodnim i wschodnim (por. rys. 2 i 6a). Ze względów technicznych wszystkie listwy podczas montażu odchyłono od pionu o około  $5^{\circ}$ .

Analizując otrzymane rezultaty stwierdzono, że:

- temperatura początkowa betonu wynosiła  $28^{\circ}\text{C}$ , natomiast temperatura otoczenia podczas betonowania  $26^{\circ}\text{C}$ ,
- największa temperatura w wewnętrznej strefie przekroju jest osiągana po 24-36 h od ułożenia betonu,
- po około 168 h, różnica temperatury między środkiem dźwigara a powierzchnią górną przęsła wynosi odpowiednio  $26^{\circ}\text{C}$  (listwa A),  $23^{\circ}\text{C}$  (listwa B) i  $20^{\circ}\text{C}$  (listwa C),
- największa różnica temperatury mierzona na wysokości dźwigara wynosiła (licząc od powierzchni górnej do spodu dźwigara) nawet  $48^{\circ}\text{C}$ ,
- po upływie 24 h różnica temperatur między powierzchnią górną a dolną dźwigara (do głębokość pomiaru 143 cm) dochodziła odpowiednio  $33^{\circ}\text{C}$  (listwa A),  $26^{\circ}\text{C}$  (listwa B) i  $27^{\circ}\text{C}$  (listwa C),
- zanotowano wysoki gradient temperatur między powierzchnią zewnętrzną przęsła a kolejnymi punktami pomiarowymi, stopniowo zmniejszający się w głąb dźwigara.



Rys. 7. Wartości temperatur w funkcji czasu w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej przęsła łącznicy dojazdowej zachodniej (listwa pomiarowa pionowa B)



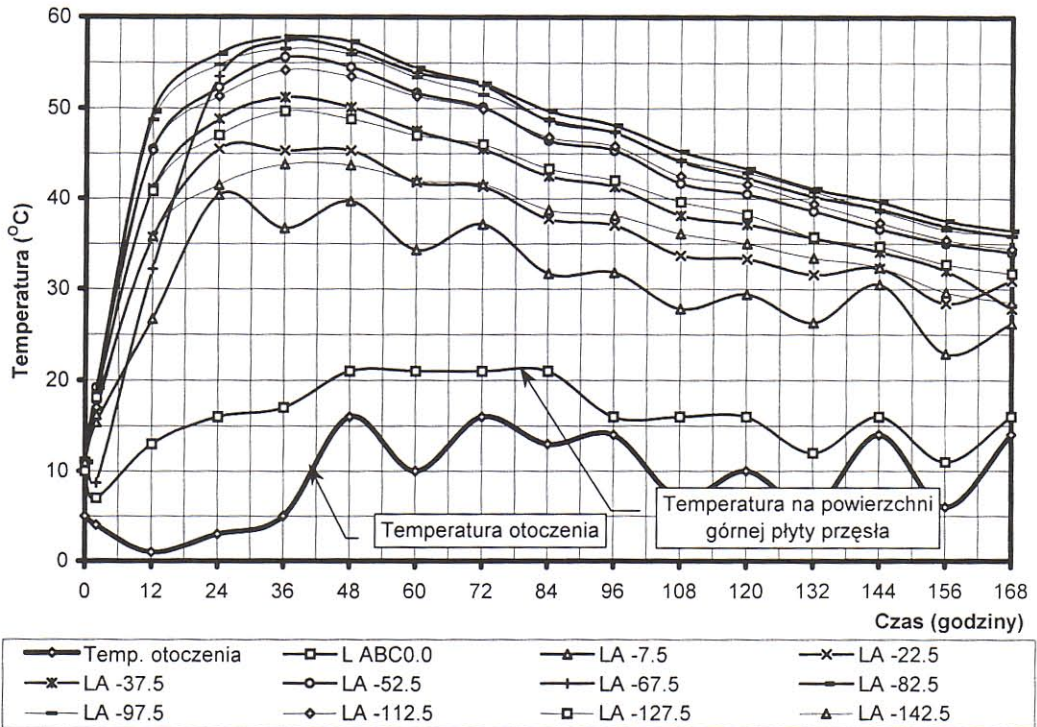
Rys. 8. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej zachodniej (listwa pomiarowa pionowa B)

b) Rozkład temperatur w przęśle łącznicy wschodniej.

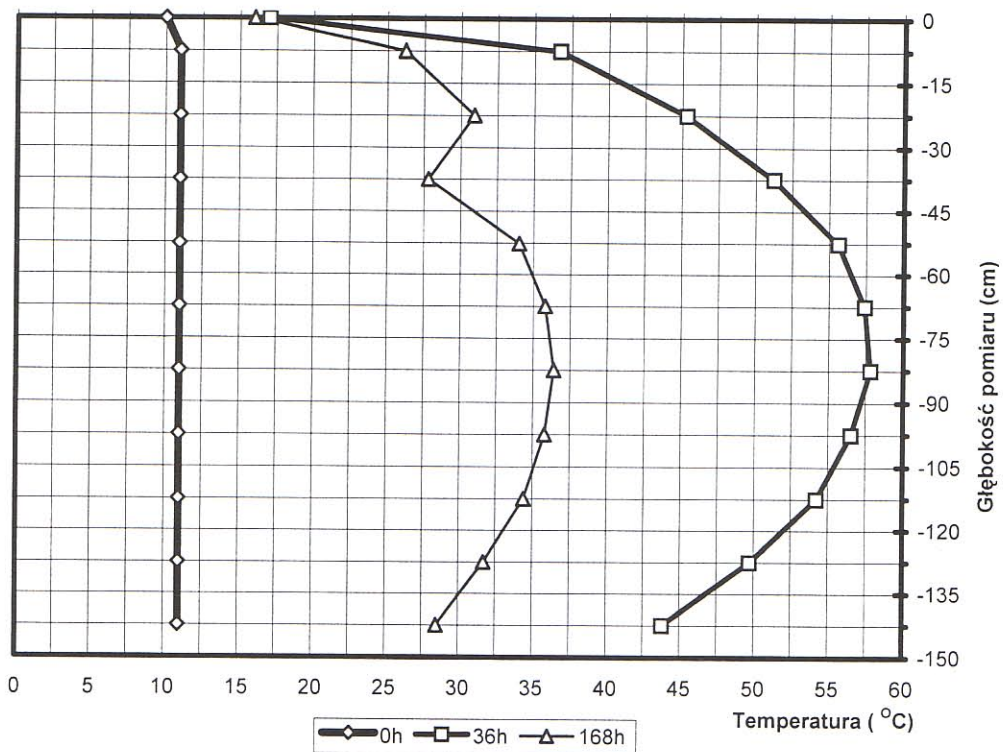
Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów temperatur w środku rozpiętości przęśla łącznicy dojazdowej wschodniej. Pomiar wykonano na wysokości dźwigara, ustawiając pionowo listwę A w osi dźwigara (por. rys. 3 i 6b).

Analizując otrzymane rezultaty stwierdzono, że:

- temperatura początkowa betonu wynosiła  $11^{\circ}\text{C}$ , natomiast temperatura otoczenia podczas betonowania  $4^{\circ}\text{C}$ ,
- największa temperatura w wewnętrznej strefie przekroju jest osiągana po 36 h od ułożenia betonu,
- po około 168 h, różnica temperatury między środkiem dźwigara a powierzchnią górną przęśla wynosi  $21^{\circ}\text{C}$ ,
- największa różnica temperatury mierzona na wysokości dźwigara wynosiła (licząc od powierzchni górnej do spodu dźwigara) nawet  $41^{\circ}\text{C}$ ,
- po upływie 36 h różnica temperatur między powierzchnią górną a dolną dźwigara (do głębokość pomiaru 143 cm) dochodziła  $27^{\circ}\text{C}$ ,
- zanotowano wysoki gradient temperatur między powierzchnią zewnętrzną przęśla a kolejnymi punktami pomiarowymi, stopniowo zmniejszający się w głąb dźwigara.



Rys. 9. Wartości temperatur w funkcji czasu w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej przęśla łącznicy dojazdowej wschodniej



Rys. 10. Rozkład temperatur w przekroju poprzecznym przęsła łącznicy dojazdowej wschodniej

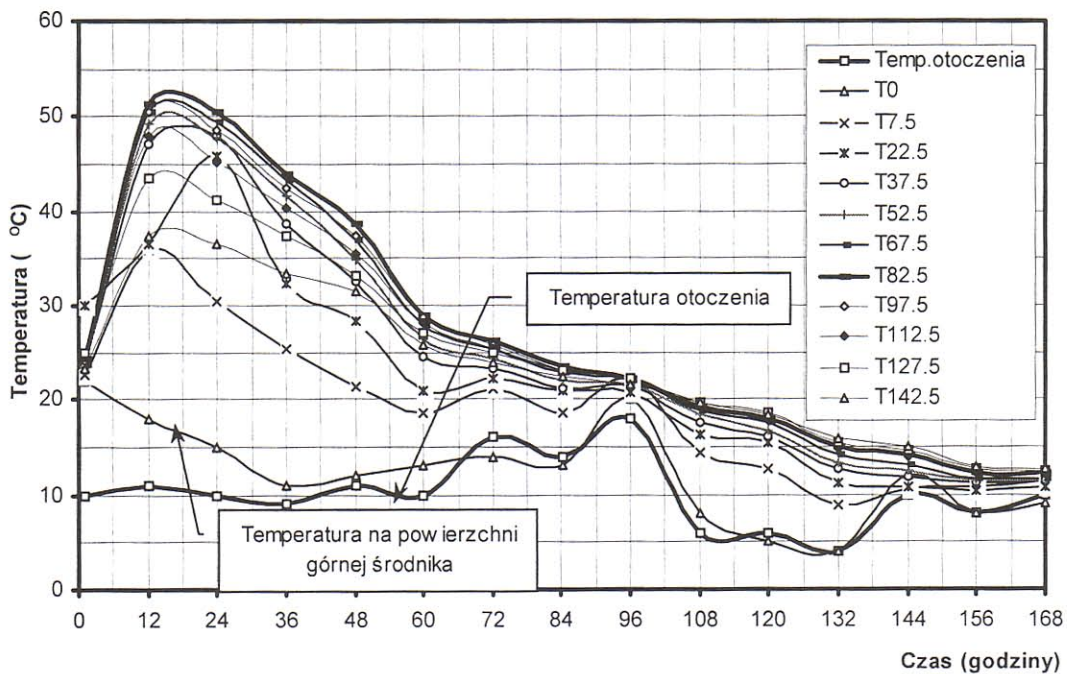
c) Rozkład temperatur w środku przęsła estakady głównej.

Na rysunkach 11÷14 przedstawiono wyniki pomiarów temperatur wykonane w środku środka przęsła estakady głównej.

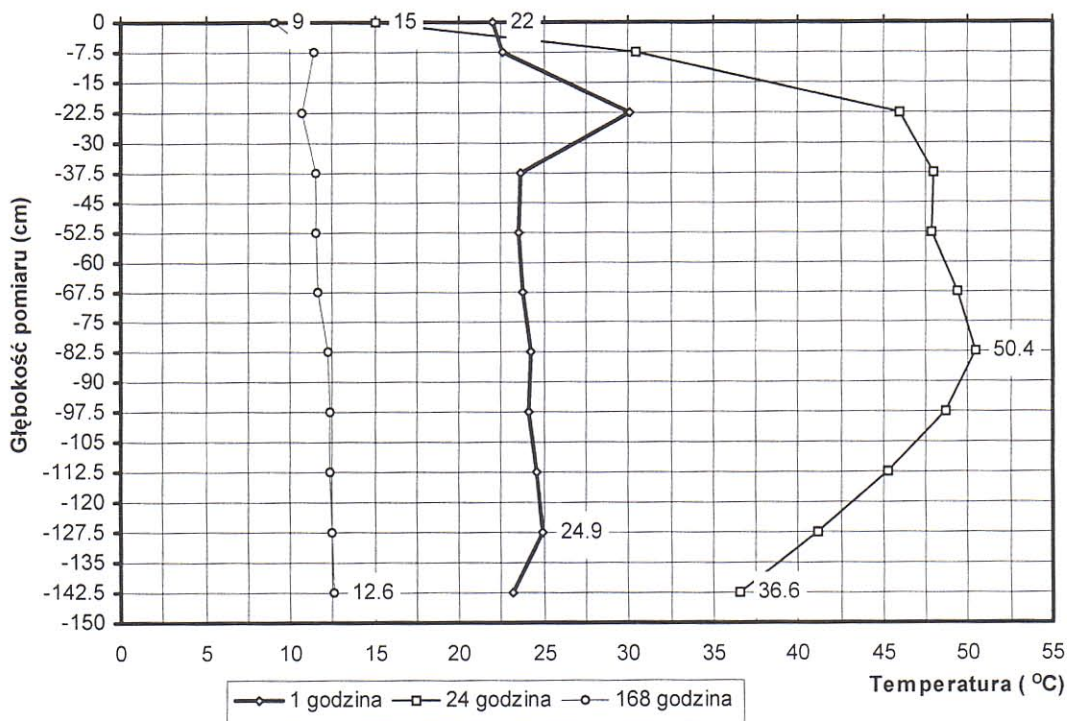
Pomiar na rys. 11 i 12 wykonano przy ustawieniu pionowej listwy A w osi środka (por. rys. 4 i 6c), natomiast pomiar (por. rys. 13 i 14) wykonano przy ustawieniu poziomym listwy B na środku wysokości środka (por. rys. 4 i 6c).

Analizując otrzymane rezultaty stwierdzono, że:

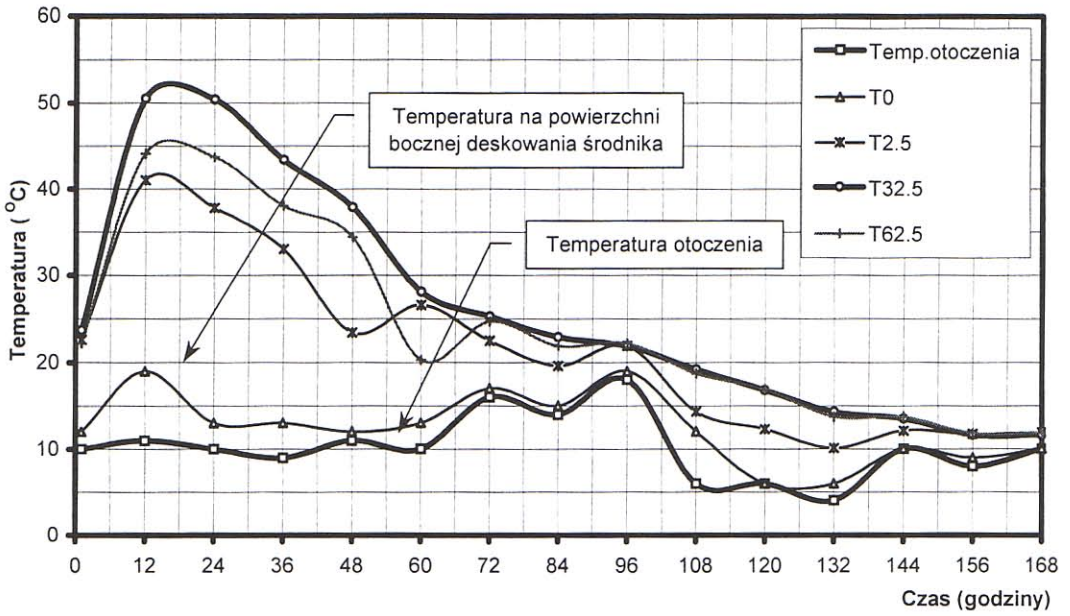
- temperatura początkowa betonu wynosiła około  $12^{\circ}\text{C}$ , natomiast temperatura otoczenia podczas betonowania  $10^{\circ}\text{C}$ ,
- największa temperatura w wewnętrznej strefie przekroju jest osiągnięta po 20-24 h od ułożenia betonu,
- po około 168 h, temperatura w środku jest ustabilizowana,
- największa różnica temperatury mierzona na wysokości środka wynosiła (licząc od powierzchni górnej do spodu środka) nawet  $41^{\circ}\text{C}$ , natomiast na szerokości środka  $15^{\circ}\text{C}$ ,
- po upływie 24 h, różnica temperatur między powierzchnią górną a dolną środka (do głębokość pomiaru 143 cm) dochodziła do  $22^{\circ}\text{C}$ ,
- zanotowano wysoki gradient temperatur między powierzchnią zewnętrzną środka a kolejnymi punktami pomiarowymi, stopniowo zmniejszający się w głąb środka.



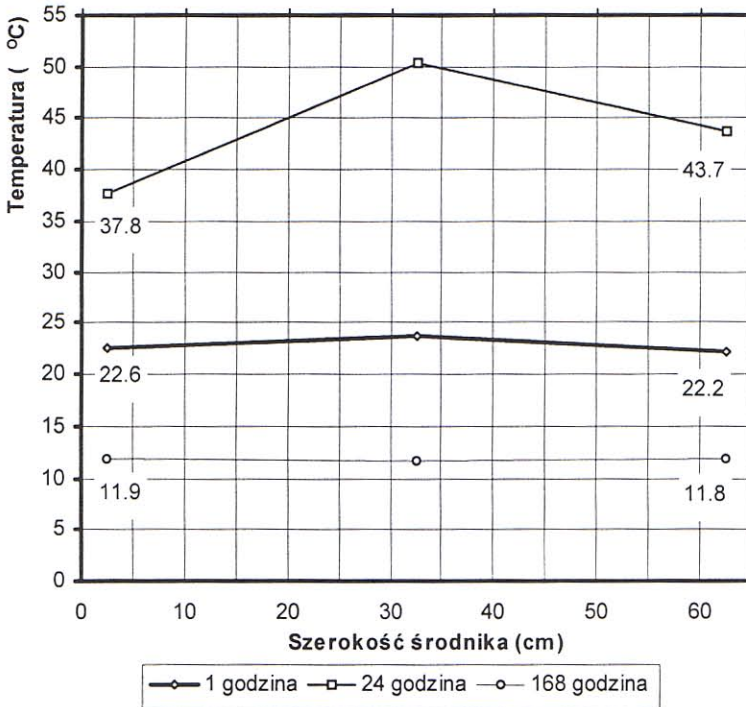
Rys. 11. Wartości temperatur w funkcji czasu w poszczególnych punktach osi pomiarowej pionowej (środnik wschodni przeszła estakady głównej)



Rys. 12. Rozkład temperatur na wysokości środnika w przeszła estakady głównej (środnik wschodni)



Rys. 13. Wartości temperatur w funkcji czasu w poszczególnych punktach osi poziomej (średnik wschodni przeszła estakady głównej)



Rys. 14. Rozkład temperatur na szerokości średnika w przeszle estakady głównej (średnik wschodni)

#### 4. Posumowanie

Przedstawione w artykule wyniki badań rozkładu temperatury w masywnych elementach mogą stanowić podstawę do weryfikacji modeli teoretycznych opisujących zjawisko powstawania samonaprężeń w konstrukcjach betonowych.

Wykonane badania o różnych porach roku, przy różnych warunkach zewnętrznych (temperatura otoczenia) i wewnętrznych (temperatura początkowa mieszanki betonowej) miały na celu zaobserwowanie wpływu tych czynników na rozkład w czasie pul temperatur w badanych elementach. Pomimo znacznie niższych temperatur w okresie wiosennym, zarówno otoczenia jak i początkowej temperatury wbudowywanego betonu (przesło estakady dojazdowej wschodniej) największa zaobserwowana różnica temperatur między powierzchnią zewnętrzną a wewnętrzną badanego przesła wynosiła  $41^{\circ}\text{C}$ , i było tylko o  $7^{\circ}\text{C}$  ( $48^{\circ}\text{C}$ ) niższa od różnicy temperatur w przesłach estakady zachodniej betonowanej w okresie lata.

Znajomość rozkładu temperatury wewnętrznej oraz przyrostu wytrzymałości podczas twardnienia betonu, umożliwia przewidzenie wielkości samonaprężeń termicznych [6],[15], zachodzących wewnątrz elementu betonowego a nawet kontrolę tego zjawiska. Obecny stan zaawansowanych technik komputerowych bazujących na metodzie elementów skończonych umożliwia projektantom modelowanie zjawisk zachodzących podczas twardnienia betonu, wprowadzając szerokie możliwości w kontrolowaniu tego niepożądanego zjawiska.

#### Literatura

- [1] FLAGA K., Wpływ naprężeń własnych na destrukcję naprężeniową i parametry wytrzymałościowe betonu. "Inżynieria i Budownictwo", nr 6/1995.
- [2] FLAGA K., Wpływ ciepła hydratacji cementu na możliwość zarysowania konstrukcji żelbetonowych o rozwiniętym przekroju poprzecznym. "Inżynieria i Budownictwo", nr 5/1998.
- [3] FLAGA K., Skurcz betonu a trwałość mostów betonowych. "Inżynieria i Budownictwo", nr 7-8/1988.
- [4] GHALI A., FAVRE R., Concrete structures. Stresses and deformations. E & FN Spon, London UK. 1994.
- [5] JASICZAK J., MIKOŁAJCZYK P., Technologia betonu modyfikowanego domieszkami i dodatkami. Przegląd tendencji krajowych i zagranicznych. Politechnika Poznańska, Poznań 1997.
- [6] KIERNOŻYCKI W., Termiczne naprężenia wymuszone w betonowych budowlach masywnych z uwzględnieniem zjawisk reologicznych. Praca Naukowa Politechniki Szczecińskiej nr 487, Instytut Inżynierii Lądowej Nr31.
- [7] KIERNOŻYCKI W., Niektóre problemy techniczne wykonawstwa betonowych budowli masywnych. "Inżynieria i Budownictwo", nr 3/1995.
- [8] KIERNOŻYCKI W., ŚLUSAREK J., FREIDENBERG P., Temperatury twardnienia betonu wysokowartościowego. "Inżynieria i Budownictwo", nr 5/1997.
- [9] KUCNEROWICZ-JAKUBOWSKA M.: Zagadnienia technologii betonu na budowie pochylni Wulkan Nowy Stoczni Szczecińskiej. "Inżynieria i Budownictwo", nr 5/2001.
- [10] KUMAR MECHTA P., MONTEIRO P.J.M., Concrete. Microstructure, properties, and materials. Second edition.
- [11] NEVILLE A. M., Właściwości betonu. Polski Cement Sp. Z o.o., Kraków 2000.
- [12] NING LIU, GUANG-TING LIU., Time-dependent reliability assessment for mass concrete structures. Elsevier. Structural Safety 21 (1999) 23-43.
- [13] PIASTA J., PIASTA W. G., Beton zwykły. Arkady, Warszawa 1997.

- [14] RAJSKI O., Sprawozdanie z badań do oceny betonu wbudowanego w obiekty mostowe na budowie Autostrady A4 Wrocław – Gliwice. Symbol pracy IBDiM-TV 28599/W-627 Żmigród - Węglowo. Lipiec 1999 rok.
- [15] WITAKOWSKI P., Termodynamiczna teoria dojrzewania. Zastosowanie do konstrukcji masywnych z betonu. Politechnika Krakowska, Zeszyt Naukowy nr 1, Kraków 1998.

## **TEMPERATURE DISTRIBUTION IN MASS CONCRETE, DURING HARDENING OF YOUNG CONCRETE IN BRIDGE STRUCTURE**

### **Summary**

Report present results of executed researches of temperature distribution in mass concrete over a bridge cross section, during hardening of young concrete. Subjects of research are spans of access over bridges (west side bridge and east side bridge) to the main over bridge (Fig. 2,3), and webs of main box-girder bridge (Fig. 4). Researches were executed on site of newly build bridge in the city of Wrocław.