SYMULACJE PRZEPŁYWU CIEPŁA PRZEZ PŁYTĘ BETONOWĄ

ALEKSANDRA MARIAK, *e-mail: aleksandra.mariak@pg.gda.pl* JACEK CHRÓŚCIELEWSKI KRZYSZTOF WILDE Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska

Streszczenie: W pracy przedstawiono symulacje numeryczne dojrzewania betonu w płycie górnej skrzynki czteroprzęsłowego mostu typu extradosed. Model matematyczny opisujący przepływ ciepła dedykowany jest do prognozowania dojrzałości i wytrzymałości twardniejącego betonu. Proponowany model zaimplementowano w autorskim programie numerycznym napisanym w środowisku Matlab. Podejście numeryczne zweryfikowano za pomocą danych doświadczalnych uzyskanych z systemu monitorowania twardniejącego betonu wdrożonego na placu budowy. Uzyskano wysoką zgodność danych numerycznych z danymi doświadczalnymi. Umożliwiło to przeprowadzenie analizy zmian warunków brzegowych na proces przepływu ciepła i jego dojrzewania w płycie betonowej mostu.

Słowa kluczowe: dojrzewanie betonu, hydratacja, temperatura, symulacje numeryczne, monitoring

1. Wstęp

Wykorzystanie systemu monitoringu technicznego w procesie inwestycyjnym niesie ze sobą znaczne korzyści zarówno w aspekcie bezpieczeństwa (kontrolowania pracy i wytężenia elementów konstrukcyjnych) jak i optymalizacji prac budowlanych. Monitoruje się obiekty nietypowe, przeznaczone dla przebywania znacznej liczby osób tj. stadiony, centra handlowe, hale przemysłowe, a także obiekty infrastrukturalne m.in. mosty podwieszane. System pomiarowy składa się z czujników przemieszczeń, przyspieszeń, odkształceń, jednak najczęściej dotyczy on elementów stalowych. Mniej powszechny jest monitoring betonowych elementów konstrukcyjnych na wczesnych etapach budowy obiektu. Wynika to z faktu trudności pomiarowych, odporności sprzętu na działanie wilgoci, stosowania niejednokrotnie czujników traconych, a także zmienności parametrów wbudowanego betonu. Stosowanie szerokiej gamy dodatków, domieszek i różnych typów cementu czyni każdą mieszankę odmienną i tym samym monitoring konstrukcji betonowej staje się każdorazowo zadaniem indywidualnym. Innego podejścia wymaga monitorowanie konstrukcji masywnych, a innego konstrukcji sprężanych. Odmienne procedury należy zastosować w warunkach zimowych czy też letnich. Zatem każdorazowo beda inne oczekiwania, co do wyników działania monitoringu, jednak kluczowymi parametrami są zmiany termiczne twardniejącego betonu w czasie, a także zmiany jego wytrzymałości oraz zmiany modułów sprężystości. Informacja o aktualnych parametrach dojrzewającego betonu jest niezwykle istotna w praktyce inżynierskiej. Problematyka dojrzewania młodego betonu oraz wpływów termicznych badana jest przez liczne zespoły badawcze między innymi przez Kaszyńską [1, 2], Flage, [3, 4] Kiernożyckiego [5].

Dane pomiarowe z monitoringu elementów betonowych w połączeniu z właściwym opisem matematycznym dostarczają podstaw do szacowania wytrzymałości betonu in situ. Korelacja pomiędzy stopniem hydratacji (zaawansowaniem procesu wiązania) z relatywnie prostą do pomiaru temperaturą twardniejącego betonu umożliwia wyznaczenie wskaźnika dojrzałości, który określa wytrzymałość i sztywność betonu. W artykule przedstawiono system monitoringu wdrożony podczas betonowania górnej płyty ustroju mostu typu extradosed. Model numeryczny zweryfikowano na podstawie badań doświadczalnych i przeprowadzono analizy wpływu zmian warunków brzegowych na proces rozchodzenia się ciepła w płycie betonowej.

2. Charakterystyka obiektu mostowego, opis systemu pomiarowego

Przedmiotem badań jest monitoring dojrzewania betonu mostu drogowego typu extradosed o rozpiętościach przęseł 132,5+206,0+206,0+132,5 m (rys. 1) [6]. Przekrój poprzeczny stanowi trójkomorowa skrzynka z betonu sprężonego klasy C 60/75 o szerokości całkowitej 28,40 m. Główne wymiary elementów przekroju poprzecznego oraz spadki są stałe na całej długości obiektów. Wysokość konstrukcyjna pomostu jest zmienna i wynosi od 4,0 m w przęśle do 6,0 m nad pylonami. Ściany zewnętrzne skrzynki dla sekcji startowej mają grubość 650 mm, natomiast ściany wewnętrzne 600 mm. Grubości ścian sekcji przęsłowej wynoszą odpowiednio 450 i 400 mm. Monitoring dojrzewania betonu realizowano w płycie górnej sekcji 4.4 (rys. 2) której grubość jest zmienna od ~0,25 m do ~0,6 m (rys. 3). Obiekt powstał w technologii betonowania nawisowego, gdzie informacja o aktualnej wytrzymałości jest konieczna do sprężania kolejnych segmentów pomostu [7].



Rys. 2. Sekcja 4.4 [6]

System pomiarowy umożliwia ciągły pomiar temperatury twardniejącego betonu, posiada funkcję gromadzenia, a także przesyłania pakietów danych *on line* [8]. Skrzynka rejestrująca wyposażona jest w akumulator umożliwiający pracę urządzenia na wypadek utraty zasilania, diody sygnalizujące zasilanie sieciowe, pracę modemu GSM i transmisje danych. Konfiguracja urządzenia odbywa się przez port USB, a maksymalna liczba kanałów pomiarowych wynosi 20.

Rejestracja temperatury realizowana była przy użyciu czujników 1-wire, których użycie stanowiło jeden z elementów innowacyjnych w realizowanych pracach. Układ zarządzający

pomiarami rozpoznaje czujniki na podstawie 16 cyfrowych numerów seryjnych. Bezpieczeństwo wymiany danych jest zapewnione dzięki kontroli CRC. Parametry interfejsu 1-wire pozwalają na budowę połączeń do 300 m, stąd bez przeszkód mogą być wdrażane na placu budowy. Na rysunku 4 przedstawiono widok na betonowaną sekcję, zaś na rysunku 5a deskowanie pod monitorowany fragment płyty górnej. Czujniki 1-wire zostały wcześniej przygotowane i rozmieszczone zgodnie z projektem na zlutowanej listwie pomiarowej mocowanej do pręta zbrojeniowego (rys. 5a).



Rys. 3. Przekrój poprzeczny sekcji 4.4 z zaznaczonym elementem pomiarowym [6]



Rys. 4. Betonowanie nawisowe, widok na sekcję 4.4



Rys. 5. a) Deskowanie segmentu 4.4 płyty górnej, b) pręt pomiarowy z rozmieszczonymi czujnikami pomiaru temperatury

Pomiar temperatury betonu realizowano w odległości 78 cm od krawędzi ściany wewnętrznej (punkty p8–p14). Monitoring zakładał także pomiar temperatury otoczenia na górze i spodzie płyty (punkty o3, o4), czego nie można było zrealizować. Czujniki o3 i o4 zostały zatopiony w betonie. Awarii uległ czujnik p8, stąd pomiar temperatury betonu realizowano w sześciu punktach p9–p14. Lokalizację punktów pomiarowych przedstawia rysunek 6.



Rys. 6. Lokalizacja punktów pomiaru temperatury

3. Matematyczny model twardniejącego betonu

W literaturze przedstawiono bardzo dużą liczbą modeli matematycznych dojrzewającego betonu uwzględniających w różny sposób aspekty termo-hygro-chemo-mechaniczne. Na przykład Freitas i inni [9] sformułowali słabo sprzęgnięty model termo-chemiczny, który upraszcza się do różniczkowego równania na pole temperatury i ewolucyjnego równania na postęp hydratacji. Jego rozwinięciem jest trójpolowy model Azenha [10], w którym pole temperatury, wilgotności względnej i przemieszczeń są podstawowymi niewiadomymi, natomiast rozwój rys w betonie wyznaczany jest z empirycznego algebraicznego domknięcia. Z kolei w modelu Di Luzio – Cusatisa [11] pojawiają się źródła ciepła z dwóch wiodących reakcji chemicznych zachodzących podczas hydratacji cementu. Istotą podejścia Gawina [12, 13] jest "potraktowanie" procesu hydratacji jako pewnej egzotermicznej reakcji chemicznej, bez wnikania w ilości poszczególnych reakcji krokowych. Powyższe modele zapewniają dobry wgląd na proces twardnienia betonu, ale z uwagi na swoją kompleksowość nie są odpowiednie do zastosowań inżynierskich. Według autorów pomiary temperatury i wydzielanego ciepła w trakcie dojrzewania są głównym parametrem pomiarowym wokół którego można budować hipotezy co do przebiegu zjawisk, teorię matematyczną jak i modele symulacyjne.

Zagadnienie dojrzewania betonu wymaga wprowadzenia równania termodynamicznego, w którym najbardziej złożony aspekt stanowi wewnętrzne źródło ciepła uwalniane w trakcie reakcji hydratacji. Powoduje ono przestrzenne zróżnicowanie pól temperatur. Termodynamiczne równanie polowe opisujące stan młodego betonu można zapisać w postaci [8, 15, 16]:

$$C\dot{T} + \nabla Q_f = \dot{Q} \tag{1},$$

$$c\rho\dot{T} - \lambda\nabla\cdot(\nabla T) = Q_{\infty}\dot{\xi}$$
⁽²⁾

gdzie:

C – pojemność cieplna betonu [J/(m³·K)],

- T temperatura [K],
- Q_f strumień ciepła (prawo Fouriera) [W/m²],
- Q wewnętrzne źródło ciepła [W/m³],
- c ciepło właściwe betonu [J/(kg·K)],
- ρ gęstość betonu [kg/m³],
- λ przewodność cieplna [W/(m·K)],
- Q_{∞} całkowite ciepło hydratacji [kJ/kg],
- ξ stopień hydratacji [-].

Do wyznaczenia pola temperatury w twardniejącym betonie potrzebna jest znajomość parametrów materiałowych takich jak ciepło właściwe, czy współczynnik przewodnictwa energii cieplnej oraz intensywność źródła ciepła związanego z egzotermiczną reakcją hydratacji składników cementu. Niestety, wszystkie te parametry, nie są, jak w większości materiałów, stałe w przestrzeni i w czasie. Szybkość ciepła hydratacji zmienia się w trakcie dojrzewania i po początkowym wzroście do wartości maksymalnej stopniowo z czasem maleje [14]. Parametry betonu zależą od składu chemicznego składników mieszanki betonowej, ich proporcji, stopnia zaawansowania reakcji chemicznych, temperatury początkowej mieszanki oraz temperatury otoczenia. Stąd równanie energii jest bezpośrednio sprzężone z równaniami kinetyki chemicznej. Pole postępu hydratacji można wyrazić równaniem [8, 15, 17, 18]

$$\dot{\xi} = k \cdot \left(\frac{A_0}{k \cdot \xi_{\infty}} + \xi\right) \cdot \left(\xi_{\infty} - \xi\right) \cdot \frac{1}{n_0} \cdot \exp\left(-\overline{n}\frac{\xi}{\xi_{\infty}}\right) \cdot \exp\left(-\frac{R \cdot T}{R \cdot T}\right) \\ \underbrace{A_{\xi}\left(pwinowactwo\ chemiczne\right)}_{A_{z} = A_{z} \cdot n} \left(promodel pwinowactwo\ chemiczne\right)} \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right) \\ (3),$$

w którym parametry materiałowe k, A_0 , ζ_{∞} , n_0 , \overline{n} wyznacza się na drodze doświadczalnej w teście adiabatycznym. Z formuły (3) wynika, że aktywacja cieplna opisana członem Arrheniusa ma zasadnicze znaczenie w fazie początkowej reakcji. W miarę postępu hydratacji reakcja ulega spowolnieniu, aż do osiągnięcia $\xi = \xi_{\infty}$.

4. Symulacje numeryczne przepływu ciepła

Rozwiązaniem termo-dynamicznego nieliniowego układu równań (2) i (3) jest pole temperatury T(x,t) i pole stopnia hydratacji $\xi(x,T,t)$. Równanie można rozwiązać stosując metodę różnic skończonych dokonując aproksymacji po przestrzeni (*x*) i czasie (*t*) z warunkami brzegowymi i warunkiem początkowym. Przyjęto jawną metodę dyskretyzacji, której ograniczeniem jest krok czasowy wynikający z kryterium stabilności schematu różnicowego.

Omówiony model został zwalidowany a następnie zastosowany do opisu pól temperatury i postępu reakcji w płycie betonowej skrzynki mostowej. Proces przepływu ciepła w płycie betonowej jest procesem typu dyfuzyjnego, a przejmowanie ciepła między płytą betonową a powietrzem (temperatura płyty jest inna niż temperatura otoczenia) zachodzi przy stałym współczynniku przejmowania ciepła. Aby obliczyć temperaturę na powierzchniach płyty, należy zastosować równanie bilansu ciepła. Strumień ciepła dopływający do powierzchni płyty musi być przejęty przez otaczające powietrze zgodnie z prawem Fouriera, pozwala to na określenie temperatury górnej i dolnej powierzchni płyty [19].

Skład mieszanki betonowej / 1 m ³	[kg]
cement CEM I 52,5N SR3	440,00
woda	143,00
piasek 0/2	632,00
grys bazaltowy 2/8	498,00
grys bazaltowy 8/16	785,00
Glenium Sky 686 1,65% m. c.	7,26
Master Air 125 0,30% m. c.	1,32
Master Pozzolith BV18 0,10% m. c	0,44

Tablica 1. Receptura mieszanki C60/75

Program do obliczania rozkładów temperatury w płycie przygotowano w programie Matlab. Parametry betonu wysokowartościowego C 60/75 (tab. 1) przyjęto częściowo z badań laboratoryjnych, a częściowo z literatury [20, 21]. Przykładowe stałe wyznaczone w warunkach adiabatycznych i testach numerycznych zawiera tablica 2.

w/c [-]	$Q_\infty \; [J/m^3]$	$\frac{k/n_0}{[h^{-1}]}$	λ [W/(m°K)]	A ₀ /k [-]
0,325	1,95×10 ⁸	2,3×10 ⁷	1,7	5×10 ⁻⁶
<i>n</i> [-]	C [J/(m ³ °C)]	E _a /R [°K]	T_g/T_d [°C]	T ₀ [°C]
5,6	$2,16 \times 10^{6}$	4875	14,3	26

Tablica 2. Parametry materiałowe

Na rysunku 7 przedstawiono zmiany temperatury *in situ* (linia ciągła) i prognozę wydzielania ciepła w płycie (linia przerywana) w punktach p9 (x = 0,07 m od góry płyty) p12 (x = 0,41 m od góry płyty) oraz p14 (x = 0,54 m od góry płyty) w ciągu pierwszych 10 dni twardnienia. W modelu zadano rzeczywiste warunki w jakich dojrzewała płyta betonowa. Przyjęto warunek początkowy odpowiadający temperaturze mieszanki betonowej tj. 26°C. Na górnej i dolnej powierzchni płyty wprowadzono warunki brzegowe uwzględniające temperaturę otoczenia i współczynnik przejmowania ciepła, od góry dla powietrza, a od dołu dla deskowania w postaci sklejki o grubości 2,1 cm.



Rys. 7. Rozwój temperatury w płycie górnej, pierwsze 10 dni

Wyraźny wzrost temperatury obserwuje się do godziny 20, kiedy to zostaje osiągnięta maksymalna wartość temperatury równa 59,6°C w punkcie p12. Po tym okresie następuje stopniowy spadek wydzielanego ciepła i stabilizacja temperatury. Punkt p9 położony przy górnej powierzchni płyty był najbardziej narażony na dobowe wahania temperatur, co jest zauważalne już od 48h twardnienia betonu. W modelu numerycznym założono stałą temperaturę otoczenia równą 14,3°C na podstawie średniej pomierzonej wartości temperatur występujących w tym okresie na budowie. Uzyskano wysoką zgodność danych pomiarowych z prognozą numeryczną. Największą różnicę obserwuje się w punkcie zlokalizowanym w pobliżu środka płyty (p12). Jest to błąd rzędu 3°C.

Przebieg temperatur konstrukcji w czasie i przestrzeni można przeglądać na profilu zmian temperatury po grubości płyty w godzinach: 12, 24, 48, 96, 168 i 336. Na jednym wykresie (rys. 8) naniesione są wyniki symulacji (linia ciągła) oraz wartości pomierzone w danej chwili i w danym punkcie na rzeczywistej konstrukcji (kropki). Dane doświadczalne potwierdzają poprawność uzyskanych danych numerycznych.



Rys. 8. Profil rozkładu temperatury

Rozwiązanie zagadnienia w dziedzinie czasu i przestrzeni umożliwiło prezentacje zjawiska rozchodzenia się ciepła twardniejącego betonu w postaci przestrzennego wykresu (rys. 9) oraz mapy rozkładu temperatury (rys. 10). W pierwszych kilku godzinach temperatura równa jest temperaturze mieszanki i dalej stopniowo wzrasta, by po około 192 h dojrzewania osiągnąć temperaturę równą temperaturze otoczenia. Zauważalny jest także wpływ deskowania na spodzie płyty (x = 0,56 m), który utrudnia odpływ ciepła.



Rys. 9. Rozkład zmian temperatury w czasie i przestrzeni



Rys. 10. Mapa rozkładu temperatury w czasie i po grubości płyty

Tak zwalidowany model wykorzystano do przeprowadzenia symulacji zmian temperatury w zależności od przyjętych warunków brzegowych (rys. 11). Dokonano zmiany tych warunków wprowadzając na górze płyty warstwę styropianu o grubości tg = 5 cm, który zamontowany był w czasie od 20 do 72 godziny. Rezultaty wyników numerycznych przedstawiono na rys. 12 i 13.

Nałożenie dodatkowej izolacji spowodowało wzrost temperatury w punktach położonych na górze płyty. Widoczny jest także wyraźnie moment zdjęcia izolacji, na przykład w punkcie p9.







Rys. 12. Rozwój temperatury, warstwa styropianu o gr. 5 cm na górze płyty w czasie 20-72 h



Rys. 13. Mapa rozkładu temperatury w czasie i po grubości płyty, styropian o gr. 5 cm

W kolejnym podejściu zwiększono grubość izolacji do 10 cm (rys. 14, 15). Takie parametry izolacji spowodowały efekt grzania się górnej warstwy płyty bardziej niż jej wnętrza i przesunięcie w czasie ekstremum wystąpienia temperatury maksymalnej.



Rys. 14. Rozwój temperatury, warstwa styropianu o gr. 10 cm na górze płyty w czasie 20-72 h

Dodatkowo rozważono sytuację, w której jako warunek brzegowy założono tylko temperaturę otoczenia, nie uwzględniając współczynników przejmowania ciepła (rys. 16). Symulacje tego przypadku wykazały, że najwyższe temperatury pojawiają się w środku płyty, osiągając przy tym temperaturę ok. 20°C niższą niż w rzeczywistości. Przypadek ten jest nierealistyczny, ale analiza jego wyników pokazuje jak istotne, w badanym zagadnieniu modelowania dojrzewania młodego betonu, jest poprawne określenie warunków brzegowych w celu rzeczywistego odzwierciedlenia przepływu ciepła w elemencie betonowym.



Rys. 15. Mapa rozkładu temperatury w czasie i po grubości płyty, styropian o gr. 10 cm



Rys. 16. Mapa rozkładu temperatury w czasie i po grubości płyty, tylko temperatura otoczenia

5. Podsumowanie

Wdrożenie systemu monitorowania twardniejącego betonu umożliwia ciągłą kontrolę zmian termicznych wewnątrz dojrzewającego bloku betonowego. Interpretacja pozyskanych danych wymaga analiz numerycznych. Zastosowany model numeryczny pozwala prognozować tempo rozwoju temperatury, wystąpienie maksimum temperatur i oszacowanie czasu potrzebnego na wyrównanie temperatury elementu z temperaturą otoczenia. Tworzenie takich symulacji dostarcza niezwykle ważnych informacji pozwalających wykonawcy na właściwą pielęgnację elementu betonowego, konieczność wprowadzenia izolacji, chłodzenia lub dogrzewania konstrukcji w celu zapewnienia jej wysokiej jakości i wymaganej trwałości.

Literatura

- Kaszyńska M., Early age properties of high-strength/high performance concrete, Cement and concrete composites, (24) s. 253–261, 2002.
- Kaszyńska M., Effect of temperature on properties of fresh self-consolidating concrete, Archives of Civil Engineering, Vol. 52, nr 2, 277–287, 2006.

- Flaga K., Funkcja temperatury betonu tężejącego w warunkach podwyższonych temperatur, Archiwum Inżynierii Lądowej, zeszyt 1–2, pp. 339–357, 1969.
- Flaga K., Energetyczne podstawy wzrostu wytrzymałości betonu tężejącego w warunkach obróbki termicznej, Archiwum Inżynierii Lądowej, XV, 1–2, 399–357, 1969.
- 5. Kiernożycki W., Betonowe konstrukcje masywne, Polski Cement, Karków 2003.
- Stefanowski T., Construction project of the expressway S7 section Miłomłyn-Olsztynek, bridge MS-3/B DK-16, Transprojekt Gdański, in polish, 2016.
- 7. Ajdukiewicz A., Mames J., Konstrukcje z betonu sprężonego, Polski Cement, Kraków, 2004.
- Chróścielewski J., Mariak A., Sabik A., Meronk B., Wilde K., Monitoring of concrete curing in extradosed bridge supported by numerical simulation, Advances in Science and Technology Research Journal, 10 (32), 254–262, 2016.
- 9. Freitas J.A.T., Cuong P.T., Faria R. Azenh M., Modelling of cement hydration in concrete structures with hybrid finite elements, Finite Elements in Analysis and Design 77, 16–30, 2013.
- Azenh M., Sousa C., Faria R., Neves A., Thermo-hygro-mechanical modelling of self-induced stresses during the service life of RC structures, Engineering Structures 33, 3442–3453, 2011.
- 11. Di Luzio G., Cusatis G., Solidification-microprestress-microplane (SMM) theory for concrete at early age: Theory, validation and application, International Journal of Solids and Structures 50, 957–975, 2013.
- Gawin D., Koniorczyk M., Pesavento F., Modelling of hydro-thermo-chemo-mechanical phenomena in building materials, Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, Vol. 61, No. 1, 2013.
- Gawin D., Pesavento F., Schrefler, B.A., Hygro-thermo-chemo-mechanical modelling of concrete at early ages and beyond. Part I: Hydration and hygro-thermal phenomena, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 67, 299–331, 2006.
- Kurzawa J., Kiernożycki W. Uwarunkowania technologiczne w procesie realizacji elementów i konstrukcji masywnych z betonu. Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej. Szczecin, t441, 1991.
- 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.
- 16. Chróścielewski J., Mariak A., Sabik A., Wilde K., Symulacje procesu dojrzewania betonu dolnej płyty skrzynki mostowej, XIV Konferencja Naukowo-Techniczna Techniki Komputerowe w Inżynierii, 18–21.10.2016
- 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.
- Mariak A., Wilde K.,: Wykładnicze równanie Arrheniusa jako funkcja dojrzałości twardniejącego betonu, Monografie Technologii Betonu, tom 2,. s. 611–626, 2016.
- 19. Piechna J. R., Programowanie w języku Fortran 90 i 95, Warszawa, 2000.
- Kim J.-K., Moon Y.-H., Eo S.-H., Compressive strength development of concrete with different curing time and temperature, Cement Concrete Reasearch, Vol. 28, No. 2, pp. 1761–1773, 1998.
- De Schutter G., Taerwe L., General hydration model for Portland cement and blast furnace slag cement, Cement Concrete Reasearch, Vol. 25, No. 3, pp. 593–604, 1995.

NUMERICAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER THROUGHT CONCRETE PLATE

Abstract: The paper presents a mathematical model of concrete curing taking into account kinetics of setting reactions dedicated to predict the maturity and strength of the hardening concrete. The numerical model is implemented in the author's program that was used to monitor thermal effects recorded in the concrete top plate of the extradosed bridge. Numerical approach was verified by experimental measurements obtained from the monitoring system of concrete curing implemented on building site. Good correlation between numerical and experimental data was achived. The results allowed to perform extended analysis of changes boundary conditions on the process of heat flow in the concrete slab.

Keywords: concrete curing, hydration, temperature, numerical simulation, monitoring