

Analiza wpływu wystającego z konstrukcji zbrojenia na dojrzałość betonu w czasie realizacji konstrukcji masywnych

EFFECT OF PROTRUDING REINFORCEMENT ON MATURITY OF CONCRETE DURING CONSTRUCTION OF MASSIVE STRUCTURES

Streszczenie

Podczas realizacji konstrukcji masywnych zarysowania betonu wywołane przez oddziaływania termiczno-skurczowe są kluczowym zagadnieniem związanym z niezawodnością tych konstrukcji. Przy wykonywaniu masywnych pylonów o znacznej wysokości, proces realizacji podzielony jest na etapy betonowania. Kończąc realizację danego etapu pozostawia się wystawione z betonu zbrojenie służące powiązaniu z kolejną warstwą. W czasie dojrzewania w wyniku egzotermicznego procesu hydratacji spoiwa beton ulega samoociepłeniu i jego temperatura znacząco wzrasta. Wystające zbrojenie może odprowadzać ciepło z betonu, co wpływa na zmianę warunków dojrzewania betonu i szybkość narastania jego wytrzymałości. W ramach badań przeprowadzono symulację warunków dojrzewania występujących w konstrukcji masywnej, monitorując temperaturę betonu w sześciennych próbkach o wymiarach 50x50x50 cm, wykonanych w szalunkach systemowych i zaizolowanych termicznie. W badaniach zastosowano beton samozagęszczalny klasy C70/85, w którym zmienny był rodzaj cementu (użyto trzy cementy: CEM I 42,5R, CEM I 52,5 R oraz cement hutniczy CEM III 42,5). Wykonywano jednocześnie zestaw dwóch próbek – jedną z wystającym zbrojeniem oraz drugą bez zbrojenia. Na podstawie wyników pomiarów temperatury wykazano, że wyprowadzone z betonu zbrojenie wpływa na obniżenie temperatury betonu średnio około 13°C, co należy uwzględnić oceniając dojrzałość betonu w konstrukcji.

Abstract

Thermal and shrinkage cracking of concrete is a key issue influencing the reliability of mass structures. Raising of mass pylons of significant height is divided on concreting stages. After ending a certain stage, the rebar is left protruding to provide connection with another layer. During the curing exothermic hydration of the binder causes concrete to undergo self-heating increasing greatly its temperature. Protruding rebar can transfer the heat out of the concrete changing the conditions of curing and the rate of strength development. The research includes simulation of curing conditions existing in mass constructions by monitoring the concrete temperature in 50x50x50 cm cubic samples. The samples were made in system formwork and insulated thermally. The study uses self-consolidating concretes class C70/85. The concretes were made with three different cements: CEM I 42,5R, CEM I 52,5R and CEM III 42,5A. Each concrete was simultaneously represented with two samples, one with protruding rebar, second without it. Based on the results of the temperature measurement it was showed that protruded rebar decreases the mean temperature by approximately 13°C, which should be considered in evaluation of concrete maturity.

1. Wprowadzenie

Problemy związane z wpływem samoociepnięcia betonu w wyniku egzotermicznego procesu hydratacji cementu na uszkodzenia konstrukcji masywnych stały się ważnym zagadnieniem już w latach 30. XX wieku (McHenry 1933 [14]). Były one analizowane szczególnie podczas budowy wielkich tam, gdzie podejmowano wiele starań aby obniżyć temperaturę dojrzewającego betonu w masywie (Chu et al. 2013 [4]). Problemy te są nadal bardzo istotne w budownictwie, szczególnie, że stosowane są betony coraz wyższych klas o niższym w/c i większej zawartości wysokiej klasy cementów, a także aktywne pyły krzemionkowe. Samoociepnięcie betonów twardniejących w konstrukcji zdecydowanie wpływa na rozwój właściwości mechanicznych betonu zarówno w młodym wieku, jak i w terminach późniejszych. Naprężenia termiczne wywołane ciepłem hydratacji mogą przewyższać wytrzymałość młodego betonu w konstrukcji masywnej, prowadząc do zarysowań już w fazie realizacji budowli. Zagadnienia te należy rozważać zarówno przy budowie typowych konstrukcji masywnych, jak płyt fundamentowych pod elektrownie wiatrowe lub turbosespołów elektrowni, poprzez konstrukcje związane z energetyką jądrową, aż po konstrukcje mostowe. Podobne problemy były poruszane w wielu artykułach krajowych ([5], [7], [8], [9], [10], [11], [13], [16]) oraz zagranicznych ([3], [4], [6], [12], [15], [17], [18]). Jednakże nikt nie analizował ucieczki ciepła w czasie betonowania przez wystające z konstrukcji zbrojenie. W pracy [18] autorzy przeprowadzają podobną symulację do analizowanej w prezentowanym referacie, ale pomijają zbrojenie.

Wielokrotnie podczas realizacji konstrukcji mostowych stwierdzano błędy, związane z niewłaściwą technologią betonowania, pielęgnacją betonu lub źle dobranym składem mieszanki, które powodowały powstanie rys termiczno-skurczowych (Flaga et al. 2013 [5], Witakowski 2011 [16]). Problemy te wystąpiły także przy realizacji pylonów dużych polskich mostów m. in. Mostu Rzędzińskiego, czy Siekierkowskiego (Biliszcuk et al. 2012 [2]). W opisywanych obiektach w trakcie robót fundamentowych oraz prac związanych z układaniem betonu w dolnych częściach pylonów, mieszanka betonowa musiała być chłodzona specjalnie w tym celu zaprojektowanymi węzownicami z wodą.

Podczas realizacji masywnych pylonów proces betonowania jest podzielony na etapy i często mamy do czynienia z przerwami roboczymi. Z wylanej już części pylonu wystają pręty zbrojeniowe przygotowane do betonowania kolejnej warstwy. Ich wpływ na temperaturę dojrzewającego betonu nie jest jednak uwzględniany w analizie obliczeniowej dotyczącej wpływu naprężeń termiczno-skurczowych na wyężenie betonu. Nie uwzględnia się możliwości odpływu ciepła przez to zbrojenie mimo tego, że współczynnik przewodnictwa ciepła stali jest około 16 razy większy niż betonu. Dodatkowym momentem, w którym ciepło może być także odprowadzane przez zbrojenie jest czas przesunięcia deskowań samowznoszących. Realizację pylonów tym sposobem stosowano w polskiej praktyce (Biliszcuk et al. 2012 [2]). Wysoki stopień zbrojenia pylonów pozwala przypuszczać, że ilość odprowadzanego ciepła może być znaczna. Dodatkowo problem ten może być istotny w przypadku użycia betonu samozagęszczalnego, który jest szczególnie rekomendowany do konstrukcji gęstozbrojonych, (Bartos 2005 [1]).

W referacie analizowano, na podstawie badań laboratoryjnych masywnych próbek betonowych, jak dużo ciepła może być odprowadzane z betonu w czasie realizacji konstrukcji, przez wystające z niego zbrojenie. Założono maksymalny procent zbrojenia oraz zastosowanie cementów o zróżnicowanej kaloryczności aby bardziej uwypuklić rejestrowany efekt zmienności temperatury dojrzewania betonu.

2. Charakterystyka mieszanek betonowych

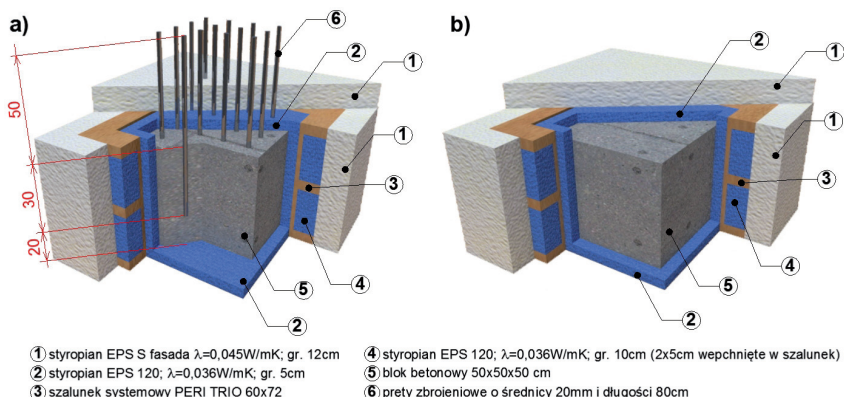
Badania laboratoryjne były przeprowadzone na trzech samozagęszczalnych mieszankach betonowych o tym samym składzie ustalonym w wcześniejszych badaniach (Kaszyńska 2002 [10], Kaszyńska 2006 [7]), różniących się tylko rodzajem cementu. Użyto trzy cementy z cementowni Górażdzie: dwa cementy portlandzkie CEM I 42,5 R i CEM I 52,5 R oraz cement hutniczy CEM III/A 42,5 N (zgodnie z normą PN-EN 197-1:2000). W mieszankach zastosowano popiół lotny z Elektrowni Dolna Odra, superplastyfikator Sika Visco-Crete 3, kruszywo naturalne: drobne (0–2 mm) oraz grube (2–8 mm). Składy i oznaczenia mieszanek przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Receptury i oznaczenia mieszanek

Beton [kg/m ³]	M1	M2	M3
Rodzaj cementu	CEM I 52,5R	CEM III/A 42,5N	CEM I 42,5R
Cement	450	450	450
Popiół lotny	110	110	110
Superplastyfikator	11	11	11
Woda	155	155	155
Kruszywo 0–2 mm	623	623	623
Kruszywo 2–8 mm	1072	1072	1072

3. Zakres badań

W ramach zaprojektowanego zadania przeprowadzono badania wstępne właściwości reologicznych mieszanek i wytrzymałościowych betonów oraz badania zasadnicze dotyczące monitoringu temperatury w czasie dojrzewania betonu. Badania wstępne pozwoliły ocenić czy spełnione są kryteria kwalifikujące mieszanki jako samozagęszczalne. Badania zasadnicze miały na celu ustalenie czy ciepło odprowadzane przez wystające z elementu zbrojenie ma wpływ na warunki dojrzewania i w konsekwencji na właściwości mechaniczne twardniejącego betonu.



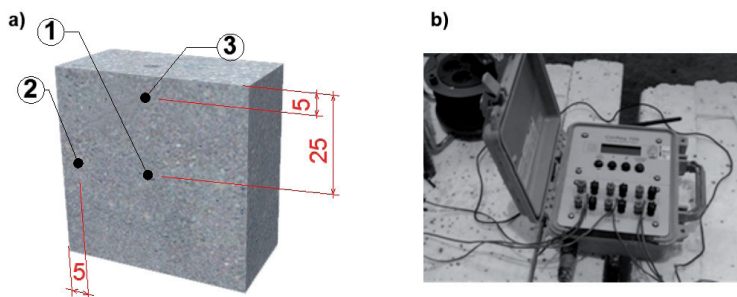
Fot. 1. Schemat próbki betonowej: a) z wystającym zbrojeniem, b) bez zbrojenia

Do badania zaprojektowano sześciennie bloki o wymiarach 50x50x50 cm, które wykonano w szalunku systemowym ocieplonym z zewnątrz i wewnątrz w celu uzyskania warunków quasi-adiabatycznych. Wylewano z jednego betonu dwa bloki jednocześnie, jeden z wystającym zbrojeniem, drugi bez zbrojenia. Pręty użyte w badaniu miały średnicę 20 mm i długość 80 cm. Były one zatopione w mieszance betonowej tak, że końcówka pręta znajdowała się 20 cm od jej dna, natomiast drugi koniec wystawał 33 cm ponad izolację próbki. W każdej ze zbrojonych próbek 36 prętów było zatopionych w betonie, co dało stopień zbrojenia 4,5%. Na fotografii 1 przedstawiono schematy wykonanych modeli badawczych, a na fotografii 2 próbki w czasie badania.



Fot. 2. Próbkki w czasie badania

Temperaturę mierzono za pomocą trzech termopar typu „T”, umieszczonych w próbkach betonowych przed rozpoczęciem betonowania. Prowadzono ciągłą rejestrację temperatury przez 7 dni przy użyciu aparatu ConReg 706. W każdej próbce jedna termopara znajdowała się w środku, druga 5 cm od szalunku przy jej bocznej powierzchni, trzecia 5 cm poniżej jej górnej powierzchni. Schemat rozmieszczenia termopar w próbce oraz aparat do rejestracji temperatur przedstawiono na fotografii 3.



Fot. 3. a) Oznaczenia punktów pomiarowych (termopar), b) Con-Reg 706

4. Wyniki badań

4.1. Badania wstępne – właściwości reologiczne i wytrzymałościowe

W tabeli 2 zestawiono wyniki normowych badań dotyczących klasy konsystencji oraz stabilności mieszanek betonowych. Badania potwierdziły, że mieszanki można zakwalifikować jako betony samozagęszczalne.

Tabela 2. Właściwości reologiczne badanych mieszanek

Mieszanka	M1	M2	M3
Rozpływ (Slump-Flow test) [mm]	770	840	700
Klasa rozptywu (Slump-Flow classes)	SF3	SF3	SF2
Lepkość T_{500} (Viscosity) [s]	6,5	4,6	5,7
Klasa T_{500} (Viscosity classes)	VS2	VS2	VS2
VSI (wskaźnik wizualnej stabilności)	0	0	0

Wytrzymałość betonu na ściskanie badano na próbkach sześciennych 15x15x15 cm po 1, 3, 7 oraz 28 dniach dojrzewania w warunkach laboratoryjnych w temperaturze około 20°C. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wytrzymałość betonu na ściskanie [MPa]

Beton	M1	M2	M3
1 dzień	30,9	2,1	11,6
3 dni	69,9	38,7	44,0
7 dni	81,5	56,2	71,2
28 dni	90,9	82,1	82,6

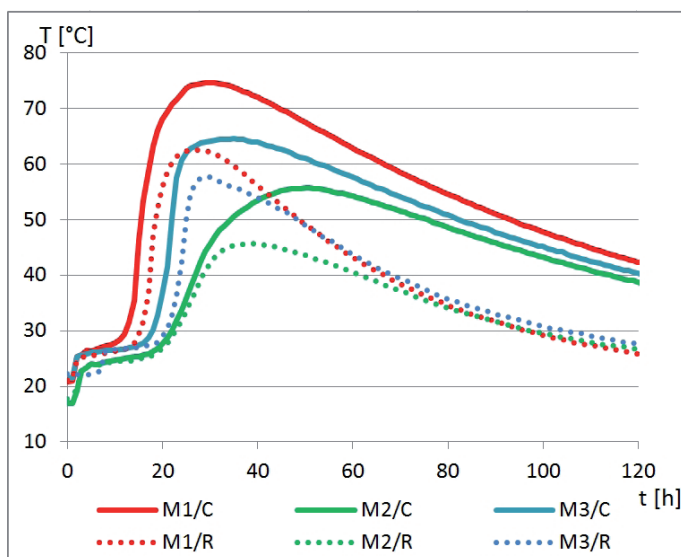
4.3. Badanie zasadnicze – pomiar temperatur w dojrzewającym betonie

Pomiar temperatury betonu prowadzono od momentu rozpoczęcia betonowania bloków. Temperatura otoczenia w laboratorium była w przedziale 18–20°C. W Tablicy 4 zestawiono maksymalne (T_{max}) i minimalne (T_{min}) temperatury oraz przyrost temperatury ($DT = T_{max} - T_{min}$) w każdym punkcie pomiarowym. Próbki niezbrojone oznaczono literą (C), a próbki z wystającym z niej zbrojeniem literą (R). Cyfra przy literach C i R oznacza numer punktu pomiarowego, zgodnie z fotografią 3, np. R1 oznacza temperaturę pomierzoną w punkcie pierwszym próbki zbrojonej.

Tabela 4. Ekstremalne temperatury pomierzone w próbkach [°C]

Beton		C 1	R 1	C2	R 2	C 3	R 3
M1	T _{min} [°C]	17,9	18,0	17,9	17,9	18,0	18,0
	T _{max} [°C]	74,6	62,5	74,5	61,5	74,5	60,8
	DT [°C]	56,7	44,5	56,6	43,6	56,5	42,8
M2	T _{min} [°C]	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0
	T _{max} [°C]	55,7	45,7	55,3	43,9	54,1	41,7
	DT [°C]	37,7	27,7	37,3	25,9	36,1	23,7
M3	T _{min} [°C]	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0
	T _{max} [°C]	64,6	57,6	64,6	56,3	61,7	50,6
	DT [°C]	46,6	39,6	46,6	38,3	43,7	32,6

Na rysunku 1 porównano temperatury w środkowym punkcie pomiarowym w próbkach zbrojonych (R) i niezbrojonych (C) wykonanych z trzech betonów.



Rys. 1. Porównanie temperatur w punkcie środkowym próbek

Zgodnie z oczekiwaniami beton M1 z cementem CEM I 52,5R uzyskał najwyższą temperaturę, a najniższą beton M2 z cementem hutniczym CEM III/A 42,5N. Różnice temperatur między poszczególnymi punktami pomiarowymi były nieznaczne, co świadczy o dobrej izolacji próbek. Badania wykazały, że w próbkach bez zbrojenia temperatura jest w każdym przypadku wyższa niż w próbkach ze zbrojeniem, co potwierdza, że wystające zbrojenie odprowadza ciepło z wnętrza betonowanego elementu.

Badania wykazały, że najwyższe samocieplenie betonu $\Delta T_{\max} = 56,7^{\circ}\text{C}$ zarejestrowano w niezbrojonym betonie na cemencie CEM I 52,5R. Najmniejszy przyrost temperatury $\Delta T_{\max} = 37,7^{\circ}\text{C}$ zanotowano w przypadku betonu na cemencie hutniczym CEM III 42,5.

W tabeli 5 porównano po jakim czasie od momentu umieszczenia betonu w szalunku beton osiągnął maksymalną temperaturę w środku próbki.

Tabela 5. Czas po którym beton osiągnął maksymalną temperaturę [h]

Beton	M1	M2	M3
Próbka niezbrojona	29	50	35
Próbka zbrojona	23	39	26

W próbkach ze zbrojeniem maksymalne temperatury niezależnie od mieszanki uzyskano wcześniej niż w próbkach bez zbrojenia. Najszybciej maksymalną temperaturę uzyskał beton M1 z cementem CEM I 52,5R, następnie beton M3 z cementem CEM I 42,5R i najdłuższy był czas dochodzenia do temperatury maksymalnej w przypadku betonu M2 z cementem hutniczym CEM III/A 42,5N. Różnice czasu między próbka zbrojoną i niezbrojoną wynoszą od 3 do 12 godzin w zależności od mieszanki.

Tabela 6 pokazuje maksymalne różnice temperatur DT_{C-R} między próbka zbrojoną T_R i niezbrojoną T_C .

Tabela 6. Maksymalna różnica temperatur między próbka zbrojoną i niezbrojoną [°C]

Beton		Numer punktu pomiarowego (zgodnie z fot. 3)		
		1	2	3
M1	T_C [°C]	74,6	74,5	74,5
	T_R [°C]	62,5	61,5	60,8
	DT_{C-R} [°C]	12,1	13,0	13,7
M2	T_C [°C]	55,7	55,3	54,1
	T_R [°C]	45,7	43,9	41,7
	DT_{C-R} [°C]	10,0	11,4	12,4
M3	T_C [°C]	64,6	64,6	61,7
	T_R [°C]	57,6	56,3	50,6
	DT_{C-R} [°C]	7,0	8,3	11,1

Badania wykazały, że im wyższa kaloryczność cementu użytego do danego betonu, tym większa ilość ciepła może uciec przez zbrojenie. Powodem takiego stanu rzeczy jest wyższa temperatura osiągnięta przez te próbki, co powoduje, że różnica temperatur między wnętrzem próbki a otoczeniem jest większa.

4. Ciepło twardnienia betonu

Kinetykę wydzielania ciepła hydratacji opisuje tzw. funkcja źródeł $W(t)$, określająca gęstość mocy ciepła hydratacji w betonie. Funkcja ta związana jest z ciepłem hydratacji następującą zależnością:

$$Q(t) = \int_0^t W(t) dt \quad (1)$$

$$W(t) = \frac{dQ}{dt} \left[\frac{W}{kg} \right] \quad (2)$$

Przedstawia ona intensywność wydzielania się ciepła i jest funkcją dwóch zmiennych czasu (t) i temperatury (T). Przebieg i wartości funkcji źródeł W(t) zależą od wielu parametrów, takich jak: czas, temperatura dojrzewania w danym punkcie betonu, ilość i rodzaj użytego cementu, dodatków i domieszek. Odpowiednie przyjęcie postaci funkcji źródeł ma bezpośredni wpływ na dokładność rozwiązania równania przewodnictwa ciepła, a to z kolei warunkuje poprawne wyznaczenie naprężeń termicznych wywołanych ciepłem hydratacji cementu w betonie. Ustalenie wpływu temperatury na funkcję źródeł jest niezwykle istotne, gdyż zmienna w czasie dojrzewania betonu temperatura wpływa na szybkość przebiegu reakcji hydratacji cementu, a przez to na kształtującą się w tych warunkach strukturę betonu i jego właściwości mechaniczne.

Na podstawie zarejestrowanych podczas badań temperatur w czasie dojrzewania betonu, obliczono ilość wydzielonego ciepła w betonie Q(t) oraz funkcję źródeł W(t). Ilość wydzielanego ciepła obliczono z wzoru (3):

$$Q(t) = \Delta T(t) \cdot \frac{c_c \cdot \gamma_c}{C} \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (3)$$

gdzie: $\Delta T(t) = T_t - T_0$;

T_t – temperatura w betonie po czasie t;

T_0 – początkowa temperatura mieszanki;

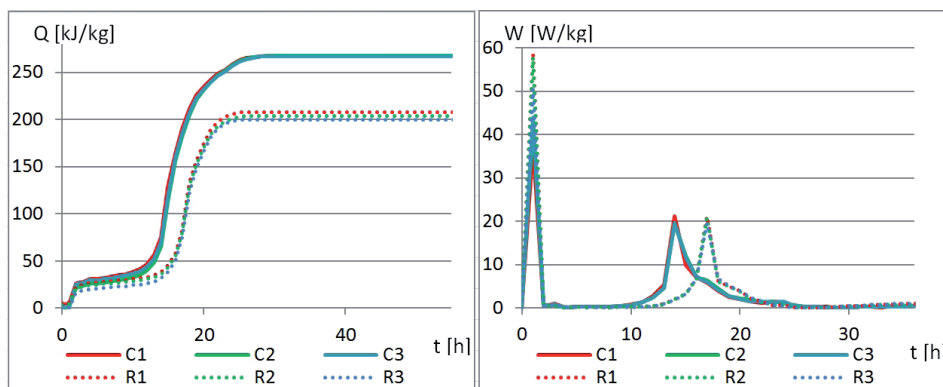
C – ilość cementu w 1m³ betonu [kg/m³];

$\gamma_c = 2421 \text{ kg/m}^3$ (ciężar objętościowy betonu);

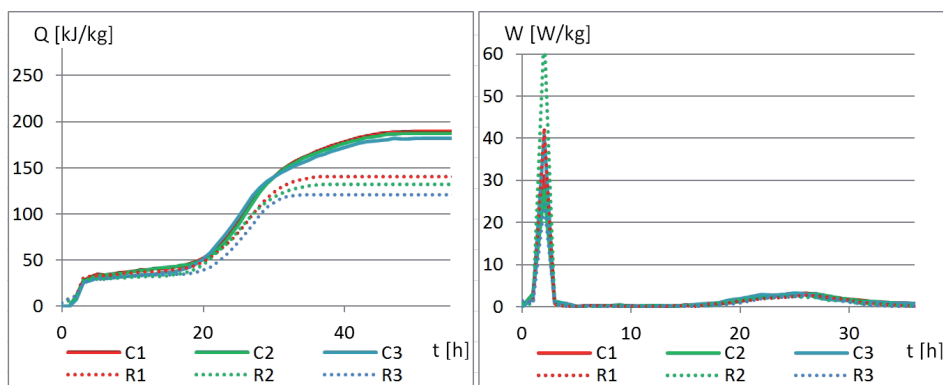
c_c – ciepło właściwe betonu, $c_c = \sum_{i=1}^n G_i f_{ci} = 0.91 \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$

$$Q(t) = \Delta T(t) \cdot \frac{0.91 \cdot 2421}{450} = 4.90 \cdot \Delta T(t) \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

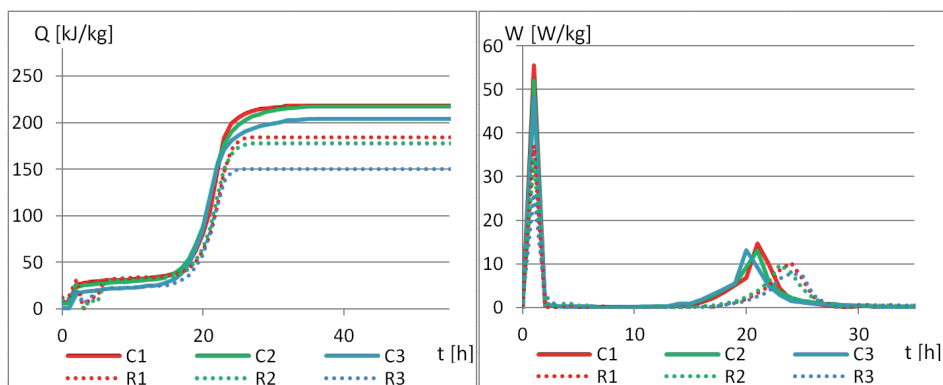
Na rysunkach 2-4 przedstawiono ilość wydzielanego się ciepła oraz funkcje źródeł dla badanych betonów wyznaczone na podstawie pomierzonych temperatur w betonie w trzech punktach pomiarowych.



Rys. 2. Ilość i kinetyka wydzielania ciepła w betonie M1

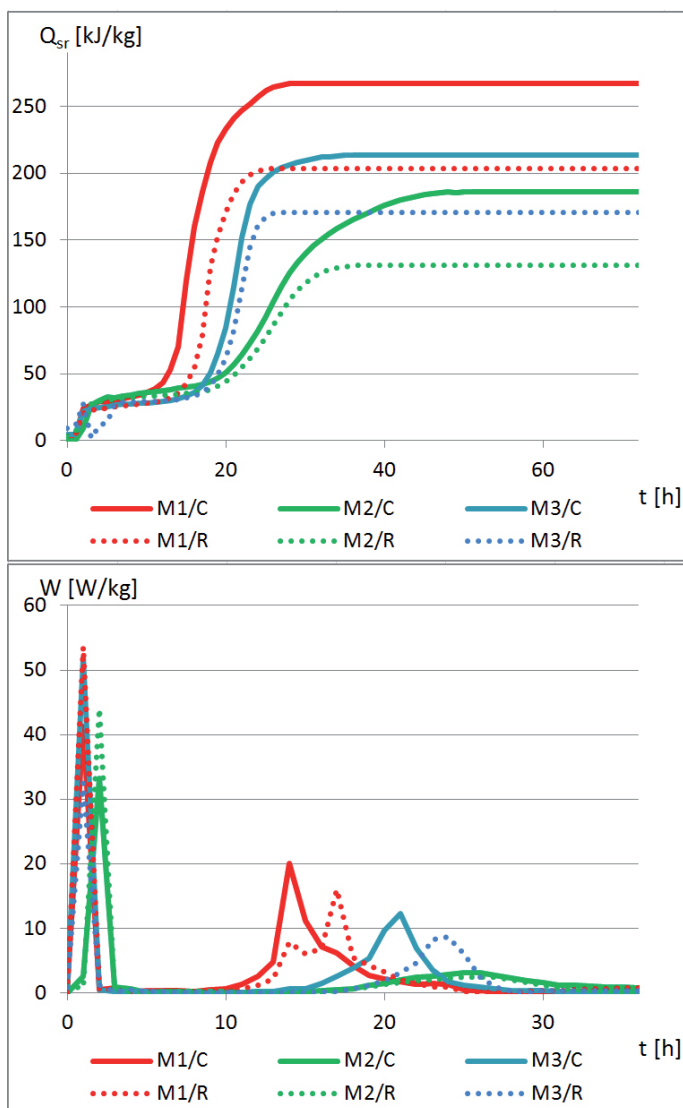


Rys. 3. Ilość i kinetyka wydzielania ciepła w betonie M2



Rys. 4. Ilość i kinetyka wydzielania ciepła w betonie M3

Na rysunku 5 porównano ilość i kinetykę wydzielania ciepła w trzech betonach wyliczone na podstawie temperatur pomierzonych w punkcie środkowym próbek betonowych.



Rys. 5. Ilość i kinetyka wydzielania ciepła w betonie M1, M2, M3

Charakterystyczne wartości wyników badań samocieplenia się betonu przedstawiono w tabeli 7: Q_{max} – ilość wydzielonego ciepła na 1kg cementu, W_{max} maksymalna wartość funkcji źródeł oraz t_{wmax} czas po którym beton osiągnął maksymalną wartość funkcji źródeł.

Tabela 7. Charakterystyczne wartości samoociepłenia się betonów

Beton	T_{\max} [°C]	DT_{\max} [°C]	Q_{\max} [kJ/kg]	W_{\max} [W/kg]	$t_{w\max}$ [h]
M1/C	74,6	56,7	267,80	21,22	14
M1/R	62,5	44,5	208,07	16,77	17
M2/C	55,7	37,7	189,47	3,26	25
M2/R	45,7	27,7	140,51	2,85	27
M3/C	64,6	46,6	218,35	14,69	21
M3/R	57,6	39,6	184,08	10,20	24

Na podstawie przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że zbrojenie wystające z betonu w czasie jego dojrzewania wpływa na ilość wydzielonego w betonie ciepła. Najwięcej ciepła wydzielono się w betonie M1 z cementem CEM I 52,5 i czas, w którym beton osiągnął maksymalną wartość funkcji źródeł jest najkrótszy (14 godz.). Beton M2 z cementem hutniczym charakteryzuje się najniższą ilością wydzielanego ciepła i najdłuższym (25 godz.) czasem osiągnięcia maksimum funkcji źródeł.

5. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań ustalono, że maksymalny przyrost temperatury w wyniku samoociepłenia betonu jest większy w próbkach niezbrojonych (56,7°C w betonie M1 37,7°C w betonie M2 i 46,6°C w betonie M3). Różnice temperatur między próbka zbrojoną a niezbrojoną wahają się w zakresie od 7°C (beton M3) do 13,7°C (beton M1).

Wyższa kaloryczność użytego do betonu cementu wpływa na szybsze wydzielanie ciepła w betonie i większą różnicę między temperaturą próbki bez zbrojenia i ze zbrojeniem. Dodatkowo zauważono, że maksymalna temperatura jest osiągana szybciej w próbkach niezbrojonych.

Badania i przeprowadzone analizy wykazują, że przy ocenie niebezpieczeństwa uszkodzenia konstrukcji w wyniku przekroczenia naprężeń termicznych w trakcie betonowania masywnych elementów o dużym stopniu zbrojenia, można po przeprowadzeniu dokładnych analiz uwzględnić korzystny wpływ wyprowadzonego z betonu zbrojenia na obniżenie temperatury dojrzewającego betonu.

Literatura

- [1] Bartos P.J.M., Self-compacting Concrete in Bridge Construction. Guide for design and construction. Concrete Bridge Development Group Technical Guide 7, Concrete Bridge Development Group, Camberley(UK) 2005.
- [2] Biliszczuk J., Onysyk J., Barcik W., Prabucki P., Sułkowski M., Szczepański J., Toczkiwicz R., Tomiczek M., Tukendorf A., Tukendorf K., Ast A., Most Rędziński w ciągu Autostradowej Obwodnicy Wrocławia, Inżynieria i Budownictwo, 2(68), 2012, str. 63-68.
- [3] Bofang Z., Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete, Butterworth-Heinemann, 2013.
- [4] Chu I., Lee Y., Amin M.N., Jang B-S, Kim J-K, Application of a thermal stress device for the prediction of stresses due to hydration heat in mass concrete structure, Construction and Building Materials, 45, 2013, str. 192-198.

- [5] Flaga K., Klemczak B., Knoppik-Wróbel A., Wczesne rysy termiczno-skurczowe w ścianach przyczółków mostowych, *Inżynieria i Budownictwo*, 4, 2013, str. 197-200.
- [6] Kadri E., Duval R., Hydration heat kinetics of concrete with silica fume, *Construction and Building Materials*, 23, 2009, str. 3388-3392.
- [7] Kaszyńska, M., Effect of curing conditions on mechanical properties of high-performance concrete and self-consolidating concrete. *Concrete Durability and Service Life Planning (ConcreteLife'06); RILEM Proceedings PRO 46, March 14-16, 2006, Israel*.
- [8] Kaszyńska, M., Mechanical properties of HPC and SCC cured in mass structures. *Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS'06; Third International Conference, July 16-19, 2006, Porto, Portugal*.
- [9] Kaszyńska M., Tendencje rozwojowe betonów samozagęszczalnych -wymagania i badania, *Mat.IX Sympozjum Naukowo-Technicznego, Reologia w technologii betonu, Gliwice 2007*, str. 53-64.
- [10] Kaszyńska M., Właściwości BWW w początkowym okresie dojrzewania, *Mat. II Konferencji Dni Betonu, Szczyrk 2002*, str. 58-65.
- [11] Kiernożycki W., *Betonowe konstrukcji masywne. Teoria, Wymiarowanie, Realizacji*, Polski Cement Sp. z o.o., Kraków, 2003.
- [12] Lin F., Song X., Gu X., Peng B., Yang L., Cracking analysis of massive concrete walls with cracking control techniques, *Construction and Building Materials*, 31, 2012, str. 12-21.
- [13] Maj, M. Ubysz, A., *Procesy egzotermiczne w wielkogabarytowych elementach betonowych*, *Materiały Budowlane*, 6, 2014, s. 15-24.
- [14] McHenry D., *Measured and computed temperature on concrete at norris dam*, *J American Concr Inst* (1937)
- [15] Riding A. K., Poole J. L., Schindler A. K., Juenger M. C. G., Foliard K. J., *Evolution of Temperature Prediction Methods for Mass Concrete Members*, *ACI Materials Journal*, V. 103, No. 5, 2006.
- [16] Witakowski P., *Uszkodzenia termiczne przyczółków mostowych*, *Czasopismo Techniczne. Środowisko*, z. 3-Ś, 2011.
- [17] Yeon J. H., Choi S., Won M. C., *In situ measurement of coefficient of thermal expansion in hardening concrete and its effect on thermal stress development*, *Construction and Building Materials*, 38, 2013, str. 306-315.
- [18] Yikici, T.A., Chen H., *Use of maturity method to estimate compressive strength of mass concrete*, *Constr. Build. Mater.*, 95, pp. 802-812, 2015.