

W ramach realizowanego przez miesięcznik „Builder” programu „Wspieramy młodych inżynierów budownictwa” dajemy możliwość pierwszych publikacji naukowych młodym doktorantom.



mgr inż. Andriy Huts
Politechnika Rzeszowska
im. Ignacego Łukasiewicza
Wydział Budownictwa,
Inżynierii Środowiska
i Architektury



Opiekun naukowy:
prof. dr hab. inż.
Grzegorz Prokowski

Konstrukcją masywną nazywa się taką strukturę, której poprzeczny wymiar jest większy niż 1 m. Istnieją różne typy wskaźników do wyznaczenia masywności konstrukcji [1]. Ciepło hydratacji cementu podczas wiązania mieszanki betonowej wywołuje zmianę temperatury otoczenia, promieniowanie słoneczne, czynniki technologiczne i inne [2]. Powstałe naprężenia termiczne mogą spowodować zarysowania na powierzchni betonu [3].

Betonowanie płyt fundamentowych i innych konstrukcji masywnych z różnych względów technologicznych lepiej wykonywać w całym bloku, na całej wysokości, jednak prowadzi to do znacznego nagrzewania konstrukcji [4]. W wyniku reakcji egzotermicznej w trakcie wiązania mieszanki betonowej powstaje nierównomierny rozkład temperatury na wysokości konstrukcji, prowadzący do niebezpiecznych naprężeń rozciągających (deformacja, wydłużenia), początkowo na powierzchni konstrukcji, a następnie w strefie środkowej [5]. W środku konstrukcji masywnej panują warunki zbliżone do adiabaticznych. Główną przyczyną mającą wpływ na wzrost temperatury i jej nierównomierny rozkład jest niska przewodność cieplna betonu, która hamuje jego chłodzenie. Jednocześnie podczas dojrzewania betonu powstają w nim odkształcenia skurczowe, które są wynikiem wymiany wilgoci z otoczeniem [6]. W konsekwencji nierównomiernych zmian objętościowych twardniejącego betonu w konstrukcji powstają naprężenia termiczno-skurczowe. Czasami te naprężenia mogą być bardzo wysokie, co prowadzi do powstania zarysowania i pęknięcia konstrukcji oraz znacznego zmniejszenia trwałości [7].

RODZAJ CEMENTU MA ZNACZENIE

Betonowe i żelbetowe konstrukcje masywne w trakcie wykonawstwa są narażone na wpływy temperatury. Miarę destrukcyjnego wpływu ciepła w dużej mierze warunkuje cement. Od jego rodzaju zależy trwałość konstrukcji.

Naprężenia termiczne w betonie zależą od składu mieszanki betonowej, rodzaju stosowanych materiałów, warunków betonowania i dojrzewania betonu oraz początkowej temperatury mieszanki betonowej. Duże znaczenie ma także geometria wykonywanej konstrukcji [6].

Cel i zakres badań

Celem badań było wykonanie próby technologicznej mającej na celu wyznaczenie kinetyki wydzielania ciepła betonu z cementami odmiennego rodzaju, a także przeprowadzenie i analiza obliczeń numerycznych pozwalających na określenie zmiany pola temperatur w przekroju fundamentu.

Badaniom poddano cztery serie próbek betonowych, różniące się rodzajem użytego cementu. Proces dojrzewania mieszanki betonowej przeprowadzono w warunkach zbliżonych do adiabaticznych, przy których wpływ temperatury otoczenia jest ograniczony. Warunki te dają możliwość pomiaru zmiennej temperatury, wynikającej z samoogrzewania się badanej próbki. Temperatura w ciągu pierwszych 24 godzin ciągle wzrasta, ponieważ oddawanie powstałego ciepła do otoczenia jest niemożliwe [8]. W celu pomiaru temperatury wykorzystano urządzenie rejestrujące typu Endress-Hauser RSG30 z czujnikami temperatury. Jeden czujnik znajdował się wewnątrz dojrzewającego betonu, natomiast drugi – na zewnątrz próbki. Pomiaru temperatury dokonywano co 10 minut w okresie tygodnia.

Cement i kruszywo

Badania przeprowadzono na mieszankach betonowych wykonanych z czterema

różnymi cementami: jednym portlandzkim – CEM I 42,5 i trzema hutniczymi – CEM III/A 32,5, CEM III/A 42,5, CEM III/A 52,5N. Jako kruszywo grube wykorzystano kruszywo bazaltowe frakcji 2–8 mm i 8–16 mm o gęstości 3,0 g/cm³ i nasiąkliwości 0,5%, natomiast jako kruszywo drobne zastosowano piasek rzeczny frakcji 0–2 mm. Zawartość frakcji pyłowo-ilastych w piasku wynosiła mniej niż 15%.

Domieszka

Domieszką plastyfikującą był superplastyfikator SikaPlast 2508, będący stabilizowanym superplastyfikatorem polikarboksylanowym, znacznie redukującym zapotrzebowanie na wodę i stosowanym w przypadku betonów o małej zawartości wody. Polepsza on urabialność, powoduje dłuższe utrzymanie konsystencji oraz skraca czas mieszania, który powinien wynosić co najmniej 30 sekund [9].

Skład mieszanki betonowej

Zbadano mieszanki betonowe o stosunku w/c = 0,4. Skład 1 m³ mieszanki betonowej oraz zarobu próbnego o objętości 15 dm³ podano w tab. 1.

Tabela 1. Skład mieszanki betonowej

| Nazwa składnika | Ilość na 1 m ³ [kg] | Ilość na 15 dm ³ [kg] |
|-----------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Woda | 165,0 | 2,48 |
| Cement | 394,0 | 5,91 |
| Piasek | 592,0 | 8,88 |
| Bazalt 2–8 mm | 629,5 | 9,44 |
| Bazalt 8–16 mm | 629,5 | 9,44 |
| Domieszka | 2,3 | 0,034 |

Wszystkie składniki w suchej postaci były dozowane wagowo z dokładnością do 10 g. Najpierw wsypany składnik stały – kruszywo i cement mieszane przez 1 minutę, dolano część wody, a później domieszkę i resztę wody. Mieszanke betonową mieszano do uzyskania jednorodnej struktury. Łączny czas mieszania wyniósł 5 minut.

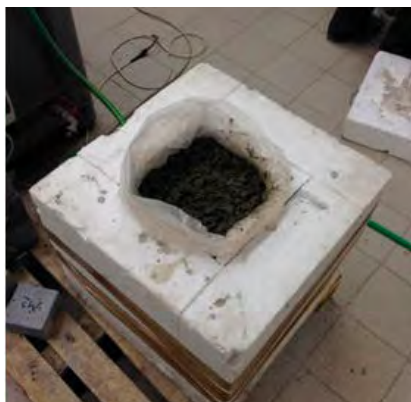
Pomiar kinetyki wydzielenia ciepła

Do stworzenia warunków semi-adiabacyjnych przy prowadzeniu badań została użyta forma styropianowa. Grubość styropianu wynosiła 20 cm. Wymiary wewnętrzne formy wynosiły 24 x 24 x 27 cm. Formę styropianową i urządzenie rejestrujące temperaturę przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Forma styropianowa i urządzenie Endress-Hauser RSG30

Wewnątrz formy styropianowej umieszczono folię plastikową. Mieszanka betonowa została ułożona w formie i zagęszczona, po czym zainstalowano w niej czujnik temperatury i przykryto formę górną pokrywą. Drugi czujnik był umieszczony na zewnątrz i służył do pomiaru temperatury otoczenia. W ten sposób mierzono temperaturę wewnątrz dojrzewającej mieszanki betonowej i temperaturę otoczenia. Mieszanke betonową umieszczoną w formie przedstawiono na rys. 2.

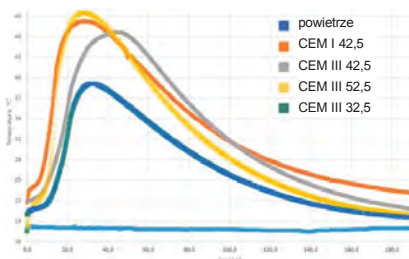


Rys. 2. Mieszanka betonowa umieszczona w formie styropianowej

Wyniki badań

Każdą z czterech próbek badano w okresie 7 dni. Rejestrator temperatury mierzył temperaturę wewnątrz próbki i temperaturę otoczenia co 10 minut. Wszystkie dane wprowadzono do programu MS Excel.

Na podstawie wyników pomiarów sporządzono wykresy dla poszczególnych rodzajów cementu pokazujące temperaturę otoczenia i temperaturę wewnątrz dojrzewającego betonu. Wykresy te przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Zmiana w czasie temperatury wewnątrz próbki betonowej w zależności od zastosowanego cementu

Z wykresów wynika, że wszystkie cemynty wykazują największe ciepło hydratacji w okresie pierwszych 24 godzin wiązania. Największy wzrost temperatury wystąpił w CEM III/A 52,5N i wyniósł 49°C po 30 godzinach wiązania, ale w dalszym okresie znacząco spada i jest mniejszy w porównaniu z CEM I 42,5 i CEM III/A 42,5.

Zwykły cement portlandzki ma wysoką temperaturę hydratacji zarówno w początkowym okresie twardnienia, jak i w okresie późniejszym [11]. Po 190 godzinach temperatura wynosiła 24°C. W porównaniu do innych cementów jest to największa wartość, co prowadzi do wniosku, że cement portlandzki CEM I jest najmniej korzystny do wykonywania betonowej konstrukcji masywnej.

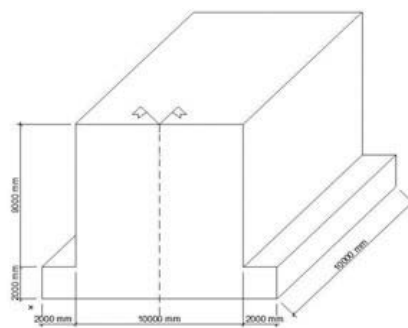
Najlepiej w betonowych konstrukcjach masywnych zachowuje się CEM III/A 32,5. Ten cement wykazał najmniejszy wzrost temperatury początkowej, wynoszący 38°C po 29 godzinach twardnienia. Następnie zaczyna spadać do najmniejszej wartości spośród

badanych cementów (temp. 20°C po 190 godzinach).

Największą wartość funkcji źródeł q po 20 godzinach wiązania ma CEM III/A 52,5 N oraz CEM I 42,5, wynosząc odpowiednio 7053 i 4080 kJ (m³·h). Najmniejszą wartość funkcji źródeł wykazał CEM III/A 32,5 – 3000 kJ (m³·h).

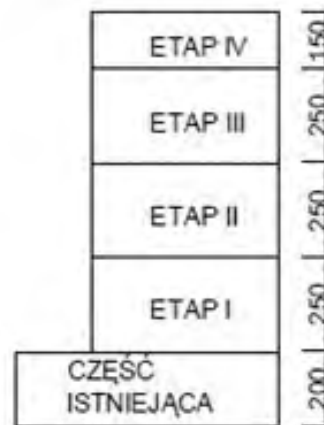
Część obliczeniowa

W części obliczeniowej zamodelowano masywny fundament – oporowy element mostu (filar mostowy). Rozważano filar mostowy o długości 30 metrów wykonany z betonu, rozpatrując odcinek 10-metrowy. Schemat fundamentu pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Schemat filara mostowego

Betonowanie elementu o wysokości 9 m jest podzielone na cztery etapy [10]. Część fundamentowa – istniejąca. Dalej wykonywano betonowanie etapowe wynoszące 2,5 m wysokości – pierwsze trzy etapy, a ostatni etap – 1,5 m. Mieszanka betonowa była podawana warstwami po 50 cm każda. Schemat wykonania etapów betonowania pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Schemat etapowego betonowania konstrukcji

W celu zamodelowania zmian temperatury w analizowanym obiekcie betonowym skorzystano z programu ADINA 8.8. Ze względu na symetrię konstrukcji rozpatrzono jej jedną część.

W programie ADINA 8.8 zamodelowano zmiany temperatury wewnątrz betonu na każdym etapie betonowania konstrukcji. Aby zapewnić warunki brzegowe, wykorzystano temperaturę zewnętrzną i temperaturę początkową mieszanki betonowej oraz czas obliczeń. W przypadku stosowania cementu hutniczego CEM III/A 32,5 rozwój temperatury na każdym etapie betonowania pokazano na rys. 6–8.

Temperatury na rys. 6–8. są podane w Kelwinach. Po zakończeniu betonowania na I etapie temperatura betonu wewnątrz konstrukcji podnosi się do 45°C (rys. 6b), natomiast temperatura na powierzchni wynosi 30°C. Na etapie II wewnętrzna temperatura podnosi się do 55°C (rys. 7c), a przy betonowaniu III etapu wzrasta do 65°C (rys. 7d). Największa temperatura wewnętrzna przy wykonaniu konstrukcji z użyciem cementu hutniczego CEM III/A 32,5 wynosi 78°C (rys. 8.), podczas gdy temperatura na powierzchni to 50°C. Różnica temperatur pomiędzy wnętrzem a powierzchnią wynosi 28°C. Zastosowanie cementu hutniczego wykazuje mniejsze wydzielanie ciepła przy dojrzewaniu betonu w porównaniu do użycia cementu portlandzkiego.

Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań wynika, że do betonowych konstrukcji masywnych korzystne jest stosowanie cementów hutniczych. Dodatek żużla w tych cementach powoduje mniejsze wydzielanie ciepła przy dojrzewaniu mieszanki betonowej zarówno w początkowym, jak i w późniejszym okresie [6]. Skutkuje to powstaniem mniejszych naprężeń termicznych oraz mniejszą skłonnością do pęknięć i zarysowań wykonywanej konstrukcji.

W celu zabezpieczenia odpowiedniej jakości betonu konstrukcji masywnej i uniknięcia pęknięć ważne jest, aby naprężenia termiczne były jak najmniejsze. Temperatura rdzeni i powierzchni betonu nie powinna różnić się więcej niż 20°C [6].

Abstrakt: W pracy przedstawiono wyniki numerycznego modelowania rozkładu temperatury w fundamencie masywnym filaru mostowego. Obliczenia przeprowadzono na różnych rodzajach cementu (CEM I 42,5, CEM III/A 32,5, CEM III/A 42,5, CEM III/A 52,5N). Określono oraz porównano wpływ wybranych parametrów składu mieszanek, jakości składników oraz warunków betonowania (temperatury otoczenia i mieszanki betonowej) na rozkład temperatury wykonywanej konstrukcji.

Badania przeprowadzono na czterech seriach betonu, różniących się użytym cementem. W trakcie dojrzewania betonu stworzono warunki zbliżone do adyabatycznych (przy których wpływ temperatury zewnętrznej jest ograniczony). Do pomiarów temperatury użyto urządzenia rejestrującego temperaturę Endress-Hauser RSG30 z czujnikami, z których jeden znajdował się wewnątrz dojrzewającego betonu, a drugi na zewnątrz próbki. Pomiarów temperatury dokonywano co 10 minut w okresie tygodnia. Na podsta-

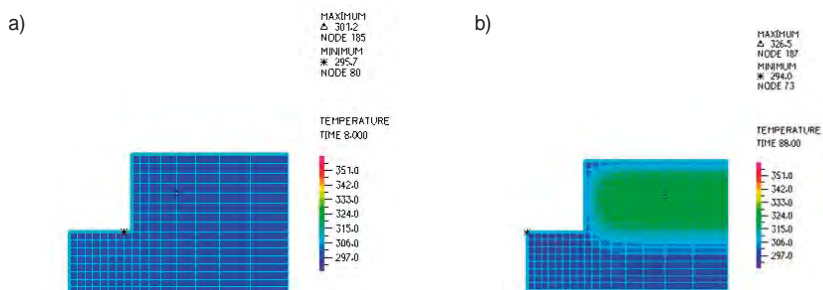
wie uzyskanych wyników pomiarów sporządzono, dla poszczególnych cementów, wykresy pokazujące zależność wzrostu temperatury od czasu, objaśniające różnice pomiędzy temperaturą otoczenia a temperaturą dojrzewającego betonu.

Przeprowadzona analiza wyników w programie ADINA 8.8 umożliwiła pokazanie temperatury wewnątrz betonu na każdym etapie betonowania konstrukcji filara mostowego.

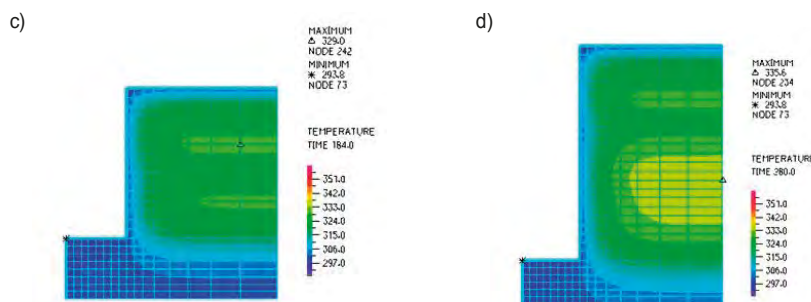
Słowa kluczowe: ciepło hydratacji, cement, filar mostowy, obliczenia numeryczne, naprężenia termiczne

Bibliografia

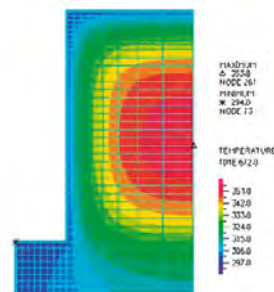
- [1] Witakowski P., Termodynamiczna teoria dojrzewania. Zastosowanie do konstrukcji masywnych z betonu, Politechnika Krakowska, ZN nr 1, Kraków 1998.
- [2] Kiernożycki W., Projektowanie i realizacja masywnych elementów płytowych konstrukcji masywnych, XXV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk 2010.
- [3] Witakowski P., Uszkodzenia termiczne przyczółków mostowych, „Czasopismo Techniczne”, 3-S/Z-21/2011.
- [4] Glinicki M., Tendencje rozwojowe technologii betonu, „Przegląd Budowlany”, nr 78 (12), s. 24-30, 2007.
- [5] Ludera P., Charakterystyka cech mechanicznych młodego betonu w elementach średniomasywnych. Przegląd literatury i badania własne, „ZN Politechniki Rzeszowskiej”, nr 208, z. 36, s. 55-71, 2004.
- [6] Kiernożycki W., Betonowe konstrukcje masywne, Polski Cement, Kraków 2003.
- [7] Neville A.M., Właściwości betonu, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2012.
- [8] Zych M., Studium przypadku wzrostu właściwości mechanicznych betonu w oparciu o pomiary temperatury, Cement Wapno Beton, nr 6, s. 383-392, 2015.
- [9] Rusin Z., Technologia betonów mrozoodpornych, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2002.
- [10] Witakowski P., Technologia budowy konstrukcji masywnych z betonu, XIII Konferencja Naukowa – Korbiełow 2001 Metody Komputerowe w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych, Korbiełow 2001.
- [11] Kurdowski W., Chemia betonu i cementu, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2010.



Rys. 6. Zmiana temperatury w kolejnych etapach betonowania: a) temperatura początkowa; b) I etap



Rys. 7. Zmiana temperatury: c) II etap; d) III etap



Rys. 8. Rozkład temperatury w konstrukcji filara-etap IV