

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Artura Goldy
pt. „Odporność betonu na oddziaływanie środowiska w konstrukcjach masywnych na
przykładzie budowy bloków nr 5 i 6 Elektrowni Opole”

Podstawa opracowania: pismo Pani Dziekan Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej dr hab. inż. Joanny Bzówki, prof. nzw. Pol. Śl. nr RB-0/4020/16/17 z dnia 07.07.2017r. z prośbą o opracowanie niniejszej recenzji.

1. Uwagi ogólne

Recenzowana praca doktorska wydana została w formie druku zwięzłego przez Wydział Budownictwa Politechniki Śląskiej oraz Katedrę Inżynierii Materiałów Budowlanych i Procesów Budowlanych w Gliwicach, w roku 2017. Praca liczy 173 strony druku, z czego 162 strony obejmuje tekst rozprawy, 11 stron zestawienie literatury liczące 153 pozycje, w znacznej części cytowane w tekście. Praca zawiera 147 rysunków oraz 53 tabele.

Rozprawa składa się z 7 rozdziałów, a to: Wprowadzenia (RI), Celu i zakresu pracy (RII), Studium literatury (RIII), Doświadczeń autora z realizacji masywnych płyt fundamentowych (RIV), Części doświadczalnej rozprawy (badania własne autora)(RV), Podsumowanie przeprowadzonych analiz i badań (RVI) oraz Wniosków (RVII). Część studialna rozprawy (rozdziały III i IV) obejmuje 43% jej treści, badania własne stanowią pozostałe 57%.

Rozprawa jest teoretyczno-doświadczalna i dotyczy ważnego zagadnienia jakim jest realizacja betonowych budowli masywnych w warunkach polskich, ze szczególnym uwzględnieniem masywnych płyt fundamentowych o dużej powierzchni, stosowanych w znaczących budowlach przemysłowych, takich jak elektrownie, huty, cementownie, itp.

2. Ocena merytoryczna rozprawy

2.1. Ocena doboru tematu

Temat rozprawy jest bardzo aktualny w budownictwie polskim. Stosowanie wielkopowierzchniowych płyt fundamentowych betonowych w sposób ciągły staje się zjawiskiem powszechnym, natomiast nie nadążają za tym zjawiskiem istniejące normy i przepisy

budowlane. Wynika stąd konieczność analizowania każdego przypadku takiej płyty z punktu widzenia jej rozmiarów, masywności, zastosowanych materiałów budowlanych, technologii wykonania i późniejszej pielęgnacji termiczno-wilgotnościowej. Punktem wyjścia tych analiz jest zapewnienie trwałości takich płyt na oddziaływania środowiskowe do których należy przede wszystkim ich odporność na naprężenia termiczno-skurczowe, jakie pojawiają się trakcie ich realizacji, a później – w trakcie eksploatacji – na rozmaite zagrożenia korozyjne w postaci karbonatyzacji, agresji siarczanowej, korozji chlorkowej, korozji spowodowanej reakcją alkalia-kruszywa, czy też cyklicznego zamrażania i odmrażania.

Wszystkie te problemy porusza w swojej rozprawie doktorant. Cechą szczególną jest to, że nie są to tylko rozważania teoretyczne poparte doświadczeniami laboratoryjnymi, ale są one zweryfikowane przy budowie dwóch masywnych płyt fundamentowych w blokach nr 5 i 6 Elektrowni Opole. Nadaje to pracy szczególną rangę związaną z praktycznym wykorzystaniem w niej badań i analiz.

2.2. Ocena tezy pracy

Sformułowana przez autora teza pracy brzmi: „współczesne rozwiązania materiałowe (cement, domieszki, dodatki typu II) pozwalają na kształtowanie składu i trwałości betonu z przeznaczeniem na konstrukcje masywne, przy znacznie ograniczonej zawartości cementu. Badania w skali laboratoryjnej zostały potwierdzone w trakcie realizacji obiektów przemysłowych”.

Tezę tę należałoby jeszcze uzupełnić o wniosek nr 10 autora, mówiący, że „aktualne zalecenia dotyczące składu betonu zawarte w klasach ekspozycji, w załączniku F do normy PN-EN 206:2014-09, są nieodpowiednie dla betonów masywnych ponieważ nie uwzględniają konieczności ograniczenia naprężeń termicznych powstających podczas twardnienia betonu. Dlatego też ocena właściwości betonu masywnego powinna być oparta na koncepcji równoważnych właściwości betonu (ECPC) lub kombinacji równoważnych właściwości użytkowych (EPCC) z uwzględnieniem rodzaju cementu, ilości i rodzaju dodatku typu II grubości otuliny zbrojenia”.

Koncepcje równoważnych właściwości, rozwijane w pracach C. Millera, nie były dotychczas rozwijane w Polsce, pomimo dopuszczenia ich zapisami aktualnej normy PN-EN 206:2014-09. Analizowana rozprawa jest przykładem realizacji tych koncepcji, potwierdzając słuszność przyjętych założeń co do składu betonu przed jego przemysłową aplikacją, pomimo, iż badane przez autora betony nie spełniały wartości granicznych składu betonu, dotyczących minimalnej zawartości cementu oraz stosunku w/c dla klas ekspozycji podanych w w/w normie.

Sformułowania powyższe rozszerzają znacznie postawioną przez autora tezę pracy i czynią ją bardzo oryginalną. Przeprowadzone w rozprawie badania, tak postawioną tezę, uwiarygadniają.

2.3. Ocena naukowej strony rozprawy

Zasadniczą częścią rozprawy jest poszukiwanie przez autora spoiwa do betonów masywnych, pozwalającego na uzyskanie jak najmniejszego ciepła hydratacji cementu, przy zachowaniu przez niego jak najlepszych cech trwałościowych z punktu widzenia wytrzymałości na ściskanie, mrozoodporności, szczelności i karbonatyzacji zabudowanego betonu. Ten cel udało się autorowi pracy osiągnąć.

W pracy swojej oparł się autor na zalecanych do betonowych konstrukcji masywnych cementach hutniczych CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA i CEM III/B 42,5L-LH/SR-NA, spełniających kryteria normy PN-EN 197-1 dla cementów o niskim ciepłe hydratacji LH oraz dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego w charakterze dodatku typu II, spełniającego wymagania normy PN-EN 450-1.

Po poszukiwaniach (badania laboratoryjne) optymalnej ilości dodatku typu II (popiół lotny krzemionkowy z Elektrowni Opole) dodawanego w ilości 26÷38% do cementu CEM III/A oraz w ilości 30÷42% do cementu CEM III/B, udało się autorowi ustalić, że najwłaściwsza ilość dodatku typu II wynosi 32% dla CEM III/A i 33% dla cementu CEM III/B. Ustalenia te wynikły po przeprowadzeniu szczegółowych badań laboratoryjnych na zaprojektowanych przez autora mieszankach betonowych, w których (dla cementu CEM III/A) zawartość cementu wynosiła tylko $C = 235 \text{ kg/m}^3$, zawartość popiołu lotnego krzemionkowego $PL = 110 \text{ kg/m}^3$, zaś stosunek $W/C_{eq} = 0,57$, natomiast dla cementu CEM III/B - $C = 220 \text{ kg/m}^3$, $PL = 120 \text{ kg/m}^3$, $W/C_{eq} = 0,60$.

Uwzględniając optymalne składy mieszanek betonowych uzyskanych przez autora, mamy z zastosowaniem współczynnika $k = 0,4$ jako ekwiwalentu zdolności wiążących popiołów lotnych typu II, ekwiwalentną ilość cementu w mieszankach z CEM III/A - $C_{eq} = 279 \text{ kg/m}^3$, zaś z cementem CEM III/B - 268 kg/m^3 . W zestawieniu z wymaganiami normy PN-EN 206:2014-09 są to ilości mniejsze niż 280 i 320 kg/m^3 - dla klas ekspozycji odpowiednio XC3 i XF3. Oznacza to, że optymalne mieszanki betonowe wytypowane przez autora pracy nie spełniały zatem wymogów normowych, spełniały natomiast kryteria równoważnych właściwości betonu (ECPC).

Cechami szczególnymi optymalnych składów spoiw do projektowanych mieszanek betonowych były:

- utrzymanie przez okres, odpowiednio (dla spoiw z CEM III/A i CEM III/B) 150 minut konsystencji wyjściowej mieszanek betonowych,
- stabilna zawartość powietrza w obu mieszankach w okresie 0÷360 minut po zarobieniu wodą - średnio 2,5%,
- stabilna gęstość obu mieszanek w okresie 0÷360 minut po zarobieniu wodą - odpowiednio 2290 i 2295 kg/m^3 ,
- uzyskanie przez obie mieszanki koniecznej wytrzymałości na ściskanie dla klasy C 30/37 już po 56 dniach dojrzewania (odpowiednio 45 i 46 MPa),
- spadek z upływem czasu głębokości penetracji wody pod ciśnieniem, odpowiednio z 53 mm (po 28 dniach) do 35 mm po 90 dniach dla betonów z cementu CEM III/A i z 46 mm do 28 mm dla betonów z cementu hutniczego CEM III/B. W każdym terminie badań, dla cementu CEM III/B, uzyskano mniejsze głębokości penetracji wody

w porównaniu z betonami z cementu hutniczego CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA. Wartość poniżej 40 mm oznacza, wg OST GDDKiA, spełnienie wymogów trwałościowych dla betonów narażonych na agresję chemiczną, odpowiadających klasie ekspozycji XA3,

- spełnienie warunków mrozoodporności betonu (dla stopnia mrozoodporności F100) wg PN-B-06250:1988 (spadek wytrzymałości na ściskanie mniejszy niż 20%) po 56 dniach dla betonów z CEM III/A i po 28 dniach dla betonów z CEM III/B,
- niska przepuszczalność jonów chlorkowych (na poziomie 1000 Kulombów po 28 dniach, spadająca wraz z czasem do poziomu 500 kulombów po 90 dniach, co oznacza niską klasę przepuszczalności wg ASTM C1202. Betony z czystymi cementami CEM III/A i CEM III/B miały po 90 dniach około 2x wyższe wartości przepuszczalności jonów chlorkowych, a beton referencyjny z CEM I – aż 10x wyższe,
- wysoką odporność na korozję siarczanową w roztworze Na_2SO_4 . Ekspansja próbek dla zapraw z obu cementów wyniosła po 1 roku tylko 0,01%, w stosunku do wartości granicznej 0,5%. Próbki zapraw z cementu CEM I SR miały tę ekspansję na poziomie 0,07%, zaś próbki z cementu CEM I uległy destrukcji po 44 tygodniach badań,
- wysoką odporność na korozję spowodowaną reakcją alkalia-kruszywo. Badania przeprowadzone wg ASTM 1260 na próbkach przebywających w roztworze 1 N NaOH w temperaturze 80°C wykazały dla zapraw z kruszywem kwarcytowym i czystym cementem CEM III/A ekspansję po 14 dniach w wysokości 0,08% (wobec granicznej 0,1%), zaś dla zapraw z reaktywnymi kruszywami (A,B,C) i cementem popiołowo-żużlowym (30% granulowany żużel wielkopiecowy oraz 20% popiół lotny krzemionkowy) – tylko 0,02%. Dla próbek zapraw z CEM I 42,5R oraz kruszywem kwarcytowym graniczna ekspansja była przekroczona już po 3 dniach, zaś dla kruszyw polodowcowych – po 4(A), 8(B) i 11(C) dniach.

Jak wynika z powyższych danych, zaproponowane przez autora pracy mieszanki betonowe z optymalnymi spoiwami wykazały pożądane cechy reologiczne i wytrzymałościowe oraz podwyższoną odporność na działanie agresywnych czynników środowiskowych. Ale najważniejszą, przeanalizowaną cechą było maksymalnie możliwe obniżenie ciepła hydratacji spoiwa.

W tym celu autor wykonał obszerne badania metodami semiadiabatyczną i izotermiczną. W metodzie semiadiabatycznej uzyskał po 168 godzinach (7 dniach) ciepło hydratacji w wysokości tylko 196,2 J/g dla zaprawy normowej ze spoiwa o składzie 68% CEM III/A + 32% PL i 181,1J/g dla spoiwa o spoiwa o składzie 67% CEM III/B +33%PL. Warto zaznaczyć, że dla czystych cementów hutniczych uzyskano wyższe wartości ciepła hydratacji już po 41 godzinach twardnienia, a to 204,2 J/g dla CEM III/A i 193,8 J/g dla CEM III/B. Widać tu ewidentny wpływ popiołu lotnego na kinetykę hydratacji mieszanego spoiwa cementowo-popiołowego.

W metodzie izotermicznej poddano badaniom próbki zaczynów z czystymi cementami CEM III/A i CEM III/B oraz mieszanymi optymalnymi spoiwami cementowo-popiołowymi,

a także z dodatkami superplastyfikatora S, plastyfikatora R i domieszki opóźniającej B. Zastosowano także dwie wartości współczynników: $w/c = 0,5$ oraz $0,45$. W rezultacie badań:

- uzyskano po 160 godzinach badań obniżenie ciepła hydratacji dla optymalnego spoiwa mieszanego z CEM III/A z poziomu 215 J/g dla czystego cementu CEM III/A do poziomu ok. 160 J/g (czyli o 25%) oraz po 168 godzinach badań dla optymalnego spoiwa mieszanego z CEM III/B z poziomu 200 J/g do poziomu około 140 J/g (czyli o 30%),
- zastosowane domieszki S,R i B spowodowały dalsze, ale nie znaczne (ok. 3%) zmniejszenie ciepła hydratacji po 160, czy też 168 godzinach badań dla spoiw mieszanych z cementów, ale też wyraźne obniżenie szybkości wydzielania ciepła w pierwszych 48 godzinach dojrzewania – z wartości ok 4J/g/h do wartości 3 J/g/h,
- zastosowanie kompleksowego dodatku SRB dla $w/c=0,46$ spowodowało istotną zmianę ~~istotną zmianę~~ kinetyki wydzielania ciepła przez badaną próbkę. Wartość końcowa ciepła hydratacji uległa po 160 (168) godzinach badań obniżeniu o dalsze 15%, ale znacznemu wydłużeniu (do około 40 godzin) uległ okres indukcji (nieujawniania się ciepła hydratacji), co miało ważne znaczenie dla wydłużenia właściwości reologicznych przez mieszankę betonową do ponad 4 godzin⁷⁰ oraz czasu początku twardnienia betonu do ponad 24 godzin.

Z ustaleń powyższych wynika, że istotą osiągnięcia naukowego ~~charakteru~~ doktoranta jest kompleksowa analiza wpływu rozmaitych czynników na skład mieszanek betonowych, technologię ich zastosowania oraz późniejszą trwałość, przy realizacji masywnych, betonowych płyt fundamentowych – w tym przypadku w blokach nr 5 i 6 Elektrowni Opole. Analiza ta pozwoliła wyjaśnić rolę dodatku typu II w postaci popiołu lotnego krzemionkowego PL w skutecznym obniżeniu ciepła hydratacji spoiw cementowo-popiołowych oraz w skutecznym wzroście odporności korozyjnej tego typu mieszanin spoiwowych.

Autor rozprawy nie poprzestał na przedstawionych powyżej badaniach, dokonując jeszcze następujących analiz:

- wyznaczenia ciepła hydratacji spoiw cementowo-popiołowych metodą izotermiczną w temperaturze 35°C,
- wyznaczenia teoretycznych pól temperatury w fundamencie głównym kotłowni nr 6 Elektrowni Opole w oparciu o sprzężone równania termodyfuzji w betonie, z wykorzystaniem programu komputerowego TEMWIL rozwiniętego na Wydziale Budownictwa Politechniki Śląskiej oraz danych wyjściowych na podstawie doświadczeń współpracującego z doktorantem Zespołu. W programie płytę fundamentową rozpatrzono wraz z przylegającym do niej gruntem. Wcześniej dokonano walidacji modelu analitycznego na podstawie pomiarów temperatury, w okresie dojrzewania betonu, w 5-ciu terminalach fundamentu maszynowni nr 6 Elektrowni Opole
- wyznaczenia w oparciu o teoretyczne pola temperatury wartości maksymalnych temperatur dla terminali 1 i 2 fundamentu kotłowni nr 6 oraz wartości różnic

temperatury pomiędzy środkiem płyty a punktem odległym o 15 cm od powierzchni górnej, dla przypadków z izolacją i bez izolacji termicznej górnej płyty. Okazało się, że pomimo zastosowania optymalnych mieszanek cementowo-popiołowych, różnice temperatury pomiędzy wnętrzem a powierzchnią (po 4 dniach dojrzewania) przed ułożeniem izolacji termicznej, w kilku przypadkach przekraczały dopuszczalną wartość 20°C, co oznaczało możliwość przypowierzchniowych zarysowań i spękań termicznych.

W celu weryfikacji w/w obliczeń teoretycznych, dokonał autor pomiaru rozkładu temperatury w fundamentach kotłowni bloków nr 5 i 6. Uzyskał wyniki dość zgodne z wynikami obliczeń teoretycznych. Dodatkowo określił właściwości betonu zabudowanego w w/w fundamentach masowych, a to:

- wytrzymałość na ściskanie próbek przechowywanych w wodzie w temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$ oraz w temperaturze zmiennej, odpowiadającej temperaturze wnętrza (środkowego obszaru) elementu wskazanej przez terminal (dla CEM III/A + PL – od $18 \div 44,2^\circ\text{C}$, dla CEM III/B + PL – od $28,0 \div 57,6^\circ\text{C}$). Po 28 dniach dojrzewania wytrzymałość próbek „cieplejszych” była wyższa (odpowiednio o 15,4 i o 12,1%) od próbek przechowywanych w warunkach normowych, po czym – po upływie 180 dni – wytrzymałości te się wyrównały, a po 360 dniach próbki „cieplejsze” wykazały niewielki spadek wytrzymałości (odpowiedni 4,5 i 3,5%) w stosunku do próbek normowych, podobnie jak to ma miejsce przy obróbce termicznej betonu. Ważne jest, że przyrost wytrzymałości na ściskanie próbek przechowywanych w warunkach normowych, w okresie od 28 do 360 dni, wyniósł aż 76,1 i 39,7%, co jest właściwe spoiwom cementowo-popiołowym,
- mrozoodporność betonu F100, która dla betonu z CEM III/A + PL została osiągnięta po 56 dniach dojrzewania ($\Delta R \leq 20\%$), zaś dla betonu z CEM III/B + PL – już po 28 dniach dojrzewania,
- szczelności betonu, określonej przez głębokość penetracji wody pod ciśnieniem zgodnie z PN-EN 12390-8:2011, która malała z upływem czasu z wartości 65 mm po 28 dniach do wartości 35 mm po 90 dniach dla betonu z CEM III/A + PL oraz z 42 mm do 28 mm – dla betonu z CEM III/B + PL. Potwierdziło to wynik badań laboratoryjnych dotyczący odporności tych betonów na agresję chemiczną, odpowiadającą klasie ekspozycji XA3,
- głębokość karbonatyzacji zabudowanego betonu, która okazała się znacząco niższa (o 30% po 90 dniach) dla betonu z CEM III/B + PL w stosunku do betonu z CEM III/A + PL, pomimo niższej ilości klinkieru portlandzkiego w składzie cementu i betonu. Ujawnił się tu efekt doszczelnienia struktury betonu przez produkty hydratacji wynikające z dużej aktywności zmielonego granulowanego żużla wielkopieczowego,
- bardzo trafnym było wprowadzenie do rozprawy pojęcia współczynnika ciepła hydratacji cementu do jego wytrzymałości na ściskanie $W_{H/R28} = Q/R_{28}$, który dla betonu z CEM III/B + PL uzyskał najniższą wartość (2x niższą niż dla betonu z CEM I 42,5R). Niska wartość tego współczynnika wskazuje na dużą możliwość redukcji ciepła

hydratacji spoiwa, przy zachowaniu zakładanej klasy wytrzymałości betonu na ściskanie.

Badania i analizy doktoranta były zatem kompleksowe, obejmowały nie tylko sferę materiałową, ale też sferę konstrukcyjną. Wiele spostrzeżeń autora można uznać za pionierskie. Z naukowego punktu widzenia pracę oceniam wysoko, wnosi ona wiele nowych treści do skomplikowanego problemu technologii i wykonania betonowych konstrukcji masywnych.

2.4. Metodyka badań

Zastosowana przez autora metodyka badań opiera się na aktualnych normach krajowych, a w przypadku ich braku na zagranicznych, a także na aktualnych wytycznych i zaleceniach. Należą do nich takie normy jak: PN-EN 206:2014-09; PN-EN 197-1:2012, PN-B-19707:2013-10, PN-EN 196-9:2010, PN-EN 450-1:2012, PN-EN 12620+ A1:2010, 8 norm PN-EN i PN-B dotyczących badania właściwości kruszyw: PN-EN 934-1:2009, PN-EN 12350-2,6,7:2011, PN-EN 12390-3,8:2011, PN-B-06250:1988, ASTM C 1202, ASTM 1260, ASTM C 1702, pr CEN/T5 12390-12, OST GDDKiA.

Wykorzystaną w badaniach aparaturę, oprócz klasycznej stanowiącej wyposażenie każdego, akredytowanego laboratorium technologii betonu, stanowiły również urządzenia i aparatura unikalna, takie jak: kalorymetr semiadiabatyyczny i izotermiczny, granulometr laserowy MasterSize 2000, automatyczne urządzenie PROOVE'it firmy German Instruments do oceny przepuszczalności jonów chlorkowych, bezprzewodowy system pomiaru temperatury w masywach betonowych firmy Delta OHM z transmisją GSM, komorę do wykonywania badań karbonatyzacji.

Zastosowane przez autora procedury i urządzenia badawcze odpowiadają aktualnym trendom nauki europejskiej i światowej.

3. Ocena strony formalnej rozprawy

Rozprawa napisana jest zwięźle, dobrą polszczyzną, w sposób jasny i zrozumiały. Drobne usterki literowe zaznaczono w tekście pracy. Do innych, zauważonych usterek należą:

- str. 16 rys.6 – nie zaznaczono miana osi odciętych,
- str. 62 rys. 37 – wartości podane na rysunku nie odpowiadają wartościom w tekście,
- str. 67₁ – dodać: w warunkach adiabatyycznych,
- str. 69 – tab.18 w kolumnie z D_{\max} 31,5mm ma być 75 zamiast 750,
- str. 70,71, rys. 50 i 51 – warto byłoby zaznaczyć poziom – 2,80m,
- str. 83 rys. 65 – w podpisie ma być CEM III/B 42,5L-LH/SR/NA,
- str. 85₃ – zdanie niejasne,
- str. 91, 92 tab. 30 i 31 – w kolumnie „nazwa składnika” ma być W/C_{eq} ,
- str. 118, 142 – użyto słów temperatur, zamiast temperatury (tu istnieje tylko liczba pojedyncza),
- str. 118₁₂ – jest błąd – ma być terminal pomiarowy 3,

- str.118₄ - brak wzmianki o rozkładzie temperatury w terminalu 1,
- str. 119 tab. 42 – nie wyjaśniono dla jakich przypadków a_Q wynosi 0,35 a dla jakich 0,5 ? Przyjęta wartość c_b jest stanowczo za mała, powinna wynosić około 0,96 kJ/kg·K; nie uzasadniono wartości α_p i α_{pi} ,
- str. 131 tab. 43 – opisy w nagłówku niekompletne, nie podano także grubości izolacji termicznej,
- str. 131 tab.44 – nie podano grubości izolacji termicznej,
- str. 113,114 oraz 117 – 2 razy występują wzory oznaczone jako nr 36 i 37,
- str. 144 – dlaczego nie naniesiono temperatury zewnętrznej na którymś z rysunków 130+133 ?

4. Uwagi krytyczne

1. W całej pracy/^{autor}pod pojęciem naprężeń termicznych w masywach betonowych rozumie się tylko tzw. naprężenia własne, wynikające z różnej odkształcalności termicznej sąsiadujących ze sobą warstw betonu. Pomija naprężenia termiczne wymuszone przez więzy zewnętrzne. W masywnych płytach fundamentowych więzy te stanowi opór gruntu na ~~powierzchnię~~^{przemierzanie} termiczne, który w fazie rozgrzewu spowoduje ściskanie płyty, a na etapie studzenia – jej rozciąganie. W rozpatrywanych płytach fundamentowych naprężenia te nie są duże, ale też nie są pomijalne. Naprężenia te osiągają większe wartości dopiero w fazie eksploatacji takich płyt na skutek skurczu betonu.
2. Wyjaśnienia wymaga sprawa dopuszczalnej różnicy temperatury pomiędzy nagrzanym wnętrzem a powierzchnią płyty. Autor przyjął, za A.M.Nevillem, tą różnicę jako $\Delta T=20^\circ C$. Jest to nieprecyzyjne, bowiem o zarysowaniu powierzchni górnej betonu decyduje tzw. przypowierzchniowy gradient temperatury, który wg ustaleń różnych autorów powinien być mniejszy niż $dT/dx=20^\circ C/m$, a w tak zwanej strefie utwardzenia (np. zapór wodnych) nawet $15^\circ C/m$. Zalecenie A. M. Nevilla odpowiada płytom fundamentowym o grubości max. 2,0m. Dla grubszych różnica ΔT może być większa, byleby gradient przypowierzchniowy spełniał powyższe warunki.
3. Wyjaśnienia wymaga też sprawa temperatury powierzchni (najczęściej górnej) betonu w masywnej płycie fundamentowej. Autor rozprawy przyjął ją na głębokości 15 cm od powierzchni górnej, co według mnie jest błędem. W oparciu o temperatury w środku płyty t_w i punktu położonego na głębokości 15 cm – t_{p15} należałoby poprowadzić parabolę (wystarczy stopnia drugiego) aby określić temperaturę powierzchni t_p . Dla $\Delta T=20^\circ C$ prowadzi ona do wzoru:

$$\Delta T_1 = \frac{\Delta T \cdot l^2}{(l - 0,15)^2}$$

czyli dla l (odległość środka płyty od powierzchni) = 1,90 m uzyskamy $\Delta T_1=23,5^\circ C$.

Różnica temperatury w punkcie odległym o 1,0 m od powierzchni płyty wyniesie wówczas:

$$\Delta T_2 = \frac{\Delta T \cdot (l - 1,0)^2}{(l - 0,15)^2}$$

czyli dla powyższych danych ($\Delta T=20^\circ\text{C}$, $l=1,90\text{m}$) uzyskamy $\Delta T_2=5,3^\circ\text{C}$. Stąd (średni) przypowierzchniowy gradient temperatury wyniesie:

$$\frac{dT}{dX} |_{1,0\text{m}} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{1,0} = 18,5 \frac{^\circ\text{C}}{\text{m}} < 20,0 \frac{^\circ\text{C}}{\text{m}}$$

4. Dyskusyjna jest również sprawa wartości ciepła hydratacji Q_c wstawianego do wzoru na adiabatyczny przyrost temperatury w masywie betonowym (dla $m \leq 2,0\text{m}^3$). Na str. 113 autor proponuje wstawić do wzoru (35) wartość Q_c jako ciepło hydratacji wydzielone do czasu osiągnięcia maksymalnej temperatury. W domyśle – przez próbkę zaprawy w kalorymetrze. Ale we wnętrzu masywnego elementu betonowego, gdzie panują adiabatyczne warunki tężenia (czyli bez wymiany ciepła z otoczeniem), również ciepło wydzieli się po osiągnięciu T_{max} w kalorymetrze i również będzie powodowało wzrost temperatury we wnętrzu masywu. Bezpieczniej jest zatem przyjąć za Q_c łączną ilość ciepła wydzieloną w okresie np. 7 dni, gdy już aktywność termiczna cementu znacznie spada. Wiąże się z tym wartości współczynników a_Q w tabeli 42.

5. Wniosek końcowy

Recenzowaną pracę oceniam wysoko. Doktorant dokonał w niej wszechstronnej analizy czynników materiałowych, technologicznych i konstrukcyjnych związanych z odpornością tzw. betonów masywnych na oddziaływania środowiskowe. Badania doktoranta i analizy dotyczyły technologii betonów przeznaczonych do realizacji dwóch konkretnych masywnych płyt fundamentowych w Elektrowni Opole, na przykładzie których wykazał pozytywne cechy spoiw cementowo-popiołowych, w szczególności dotyczących bardzo niskiego ich ciepła hydratacji, warunkującego odporność tych płyt na naprężenia termiczne. Swoje badania i analizy poparł doktorant solidnymi studiami literaturowymi. Pracę wykonał samodzielnie, systematycznie i dokładnie, a rozprawą wniósł istotny wkład do rozwoju dyscypliny naukowej budownictwo, w szczególności w zakresie technologii betonów w budowlach masywnych.

Praca spełnia wszystkie wymogi stawiane pracom doktorskim przez „Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003r. (Dz.U. nr 65) wraz z późniejszymi uzupełnieniami, w związku z czym stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie doktoranta do jej publicznej obrony.

Kazimierz Flaga

