



Prof. dr hab. inż. Kazimierz Flaga, dr h.c.m.

Kraków, 20. 04. 2016 r.

Politechnika Krakowska

R e c e n z j a

pracy doktorskiej mgr inż. Macieja Batoga

pt.: "Kształtowanie składu mieszanki betonowej z uwagi na wczesne wpływy termiczno-skurczowe w betonowych konstrukcjach masywnych"

Podstawa opracowania: Zlecenie Dziekana Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej Prof. dr hab. inż. Jana Ślusarka z dnia 31.03.2016 r.
- znak RB-0/4020/15/16 na opracowanie niniejszej recenzji.

1. Charakterystyka pracy

Opiniowana praca doktorska liczy 141 stron plus 13 stron bibliografii, zawierającej 160 pozycji literatury i 28 pozycji norm. Praca jest bogato ilustrowana i zawiera na 141 stronach tekstu 78 rysunków i 83 tabele.

Składa się z 7 rozdziałów dotyczących: Zarysu problemu (R1), Przeglądu czynników materiałowo-technologicznych i konstrukcyjnych wpływających na pola termiczno-wilgotnościowe oraz naprężenia w masywach betonowych (R2), Doświadczeń realizacyjnych w zakresie kształtowania składu mieszanek betonowych (R3), Celu, zakresu i tez pracy (R4), Własnych badań doświadczalnych (R5), Analiz numerycznych wybranych konstrukcji masywnych (R6) i Wniosków (R7).

Praca jest teoretyczno-doświadczalna i dotyczy ważnego zagadnienia naprężeń termiczno-skurczowych w betonowych konstrukcjach masywnych i o średniej masywności.

2. Ocena merytoryczna pracy

2.1. Ocena doboru tematyki

Temat pracy jest aktualny, a jej efekty poszerzają naszą wiedzę na temat wpływu składu mieszanki betonowej na zachowanie się betonowych budowli masywnych we wczesnym okresie dojrzewania betonu. Prace na temat naprężeń termiczno-skurczowych w tego typu budowlach są w całym świecie dość zaawansowane, począwszy od realizacji pierwszych wielkich zapór wodnych z betonu w USA w latach 30-tych XX wieku, niemniej wiele zagadnień wymaga

jeszcze bliższych studiów, jak np. wpływ rodzaju cementu i kruszywa na odkształcenia reologiczne (skurcz i pełzanie) w betonach o niskiej zawartości cementu w 1 m^3 , zawierającego w swym składzie dodatki nieklinkierowe.

Cementy takie są powszechnie stosowane w tego typu budowlach, głównie z uwagi na obniżone ciepło hydratacji, które rzutuje na maksymalne samoocieplenie się tego typu budowli we wczesnym okresie dojrzewania oraz na maksymalne, przypowierzchniowe gradienty temperatury, decydujące o zarysowaniach i pęknięciach tych budowli.

2.2. Ocena celu, zakresu i tez pracy

Celem pracy jest kompleksowa analiza wpływu składu mieszanki betonowej na kształtowanie się temperatury i wilgotności, rozwoju wytrzymałości i naprężeń w betonowych konstrukcjach masywnych wraz z oceną ryzyka zarysowania tych konstrukcji.

Zakres pracy obejmuje określenie wpływu na powyższe cechy betonu w konstrukcjach masywnych cementów portlandzkich klinkierowych CEM I 42,5 R oraz cementów zawierających znaczne ilości nieklinkierowych składników głównych, a to: cementu portlandzkiego żuźlowego CEM II/B-S 32,5 R, cementu portlandzkiego popiołowego CEM II/B-V 32,5 R, cementu hutniczego CEM III/A 32,5 N, cementu wieloskładnikowego CEMV/A(S-V) 32,5 R oraz cementu wieloskładnikowego o bardzo niskim cieple hydratacji VLH V/B (S-V) 22,5.

Cementy te zawierały: klinkieru portlandzkiego od $95,7 \div 32,3$ %, mielonego granulowanego żuźła wielkopieczowego od $0 \div 58,9$ %, popiołu lotnego krzemionkowego od $0 \div 33,3$ % oraz wapienia od $46 \div 0$ %. Dwa cementy, a to CEM V/A (S-V) 32,5 R oraz VLH V/B (S-V) 22,5 zawierały równocześnie – prawie w równych ilościach (odpowiednio 18,2 i 19,6 % oraz 84,4 i 33,3 %) dodatek mielonego granulowanego żuźła wielkopieczowego (S) i popiołu lotnego krzemionkowego (V).

Przyjęte do badań 6 rodzajów bardzo zróżnicowanych cementów stanowiło interesującą panoramę badawczą. Panoramę tę wzbogacił jeszcze autor o 8 cementów laboratoryjnych zestawianych z klinkieru cementu portlandzkiego oraz zawartości dodatków (S i V) w ilościach 10 %, 30 %, 50 % i 70 %, homogenizowanych w mieszalniku laboratoryjnym.

Podobnie zróżnicował autor w badanych betonach rodzaj kruszywa grubego w postaci: zwirowego z kopalni „Dziergowice” (Ż), bazaltowego z kopalni „Wilków” (B), granitowego z kopalni „Graniczna” (G) i wapiennego z kopalni „Czatkowice” (W). We wszystkich mieszankach betonowych zastosowano tylko 1 rodzaj piasku z kopalni „Dziergowice” (P).

We wszystkich mieszankach betonowych zastosowano jednakowy skład masowy, a to: $C = 300 \text{ kg/m}^3$, $W = 150 \text{ kg/m}^3$, $P = 583 \text{ kg/m}^3$, $\dot{Z}/G = 1360 \text{ kg/m}^3$.

Przy tych założeniach sformułowano 5 tez pracy, które w skrócie przedstawiają się następująco.

- Teza 1^o Skład mieszanki betonowej powinien być projektowany kompleksowo z uwzględnieniem rozwoju temperatury twardnienia, wilgotności, odkształceń, naprężeń oraz wyężenia.
- Teza 2^o Rodzaj zastosowanego cementu ma największy wpływ na wielkość maksymalnej temperatury twardnienia w konstrukcji masywnej.
- Teza 3^o Zastosowanie cementu o niskim cieple hydratacji ma szczególnie korzystne znaczenie w konstrukcjach, gdzie dominujące są naprężenia wymuszone.
- Teza 4^o W masywnych płytach fundamentowych zastosowanie cementów o niskim cieple hydratacji zmniejsza ryzyko zarysowania, ale nie gwarantuje wyeliminowania zarysowań. Korzystniejsze jest stosowanie tu cementów tylko z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego.
- Teza 5^o Istotny wpływ na kształtowanie się temperatury, naprężeń i ewentualnie ryzyko zarysowania ma rodzaj zastosowanego kruszywa. Najkorzystniejsze jest w tym zakresie kruszywo grawitowe i bazaltowe.

Powyższe tezy nie są w pełni oryginalne. Tezy 2^o i 3^o są na pewno słuszne w badaniach autora, ale dla innych warunków mogą te sprawy wyglądać inaczej. Dowody na słuszność tez 4^o i 5^o są zawarte w wynikach badań autora.

2.3. Ocena wartości naukowej pracy

Praca składa się wyraźnic z 3 części. Część pierwsza, studialna liczy 41 stron, czyli 31 % opracowania. Część druga – badania doświadczalne autora liczy 40 stron, czyli 30 % opracowania oraz część trzecia – analiza numeryczna liczy 52 strony czyli 39 %. Są zatem te 3 części pracy dość dobrze zrównoważone.

Część studialna jest obszerna, ale jest w tej pracy potrzebna. Skupił się w niej autor na analizie różnych czynników materiałowych (rodzaj cementu, współczynnik w/c, wilgotność betonu, rodzaj kruszywa, dodatki mineralne) i technologicznych (temperatura początkowa mieszanki i temperatura zewnętrzna, chłodzenie mieszanki betonowej, technologia betonowania, stosowanie izolacji i czas rozdeskowania, wewnętrzne i powierzchniowe chłodzenie) oraz geometrii i wymiarów konstrukcji na pola termiczno-wilgotnościowe i naprężenia termiczno-skurczowe w masywach betonowych. Bardzo ważnym elementem tych rozważań jest

zauważenie przez autora dodatkowego mechanizmu mogącego doprowadzić do zniszczenia masywnych konstrukcji betonowych, a mianowicie powstawania w temperaturze 65-70 °C wtórnego ettringitu czyli tzw. wewnętrzna korozja siarczanowa betonu.

Pozwoliło to autorowi na ustalenie czynników o największym znaczeniu, które w świetle studium literaturowego wpływają na ryzyko zarysowania konstrukcji masywnej. Natomiast przegląd zagranicznych realizacji 27-miu masywnych zapór wodnych oraz polskich doświadczeń realizacyjnych w zakresie kształtowania składu mieszanek betonowych do masywnych płyt fundamentowych w elektrowni Pątnów (46,0 x 46,0 x 3,5 m), w elektrowni Bełchatów (98,8 x 83,5 x 2,5÷4,5 m), pod budynek kotłowni w elektrowni Łagisza (75,8 x 42,0 x 1,8÷2,6 m), pod młyn cementu w cementowni Górażdzie (3 etapy – 5000 m³ betonu) oraz do żelbetowych ścian 18-tu przyczółków mostowych w ciągu autostrady A4 na odcinku Dębica Pustynia – Rzeszów Zachodni zwrócił uwagę autora na b. duże znaczenie problemu doboru odpowiedniego rodzaju i ilości cementu, odpowiedniego doboru rodzaju i uziarnienia kruszyw, pielęgnacji i izolowania powierzchni betonu na zabezpieczenie betonu w masywie betonowym przed wczesnym zarysowaniem termiczno-skurczowym. Wskazał też na złe rezultaty, jakie uzyskano przy betonowaniu ścian przyczółków mostowych, wykonanych na dużo wcześniej wykonanych fundamentach

Przegląd ten i sformułowane przez autora wnioski świadczą o pełnym zrozumieniu zagadnień, które wiążą się z bezpieczną realizacją masywnych konstrukcji betonowych.

W oparciu o tę wiedzę i wynikające z niej spostrzeżenia przeprowadził autor w Części 2-giej obszernie badanie laboratoryjne w zakresie: ciepła hydratacji zastosowanych cementów, współczynnika przewodności cieplnej i ciepła właściwego betonu, temperatury twardnienia betonu, odkształceń skurczowych, pełzania betonu, właściwości mechanicznych betonu (wytrzymałość na ściskanie, rozciąganie, moduł sprężystości).

Bardzo pracochłonne i cenne badania ciepła hydratacji zastosowanych cementów w okresie 0÷72 h przeprowadził autor w warunkach izotermicznych w temperaturach 20 i 50 °C oraz w warunkach semiadiabatycznych. Określił przy tym maksymalną moc cieplną [J/gh], okres indukcji oraz czas wystąpienia maksimum wydzielania się ciepła dla poszczególnych cementów.

Te i inne badania zostały przeprowadzone w oparciu o nowoczesną aparaturę, o właściwe normy oraz zostały starannie opracowane w formie wykresów i tabel. Wykazały one między innymi, że:

- zastosowanie nieklinkierowych składników głównych w składzie cementu wydłuża okres indukcji, przy czym efekt ten jest silniejszy w przypadku popiołu lotnego,

- moc cieplna głównego maksimum ulega zmniejszeniu wraz ze wzrostem ilości nieklinkierowych składników głównych,
- stopień hydratacji cementu w podwyższonych temperaturach (50°C) ulega znacznemu zwiększeniu. W przypadku cementów z dodatkami mineralnymi efekt ten jest większy niż dla cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R,
- skurcz betonu z cementami zawierającymi dodatki mineralne jest mniejszy niż z cementem portlandzkim CEM I 42 R, tym mniejszy niż więcej dodatku,
- betony z cementami zawierającymi popiół lotny krzemiankowy cechuje podwyższone (o około 50 %) pęczanie szczególnie we wczesnym okresie twardnienia (< 7 dni). Betony z pozostałymi cementami (zwłaszcza zawierającymi mielony granulowany żużel wielkopiecowy) cechuje mniejsze pęczanie niż betonów z cementem CEM I 42,5 R,
- z punktu widzenia przewodności cieplnej, pojemności cieplnej i modułu sprężystości najlepsze właściwości ma kruszywo żwirowe,
- z punktu widzenia odkształcalności betonu i stopnia jego wyężenia na naprężenia termiczno-skurczowe, kruszywo żwirowe jest najgorsze.

Z naukowego punktu widzenia dużą wartość mają rozważania i analizy przeprowadzone przez autora w trzeciej Części pracy. Wykorzystał tu autor rozwijany na Wydziale Budownictwa Politechniki Śląskiej model numeryczny twardniejącego betonu i związane z nim programy MAFEM i TEMWIL, zaś wyniki swoich badań posłużyły mu do kalibracji i walidacji tego modelu.

Część ta zawiera opis w/w modelu numerycznego umożliwiającego analizę konstrukcji żelbetowych – płyt i bloków fundamentowych, ścian zbiorników i przyczółków mostowych betonowych na wcześniej wykonanym fundamencie. Autor analizuje też możliwości tych programów i ich ograniczenia. Wśród parametrów zmiennych można w nich uwzględnić m.in. skład mieszanki betonowej, czas rozdeskowania konstrukcji, betonowanie etapowe (warstwowe), zmienne warunki środowiskowe i zróżnicowaną temperaturę początkową mieszanki betonowej, warunki gruntowe.

Autor podaje równania, w oparciu o które opracowane w/w programy, tj. FEMWIL – do wyznaczania temperatury twardnienia, zmian wilgotności i odkształceń termiczno-skurczowych oraz MAFEM – do określania naprężeń termiczno-skurczowych.

W oparciu o wyniki własnych badań doświadczalnych dokonuje kalibracji i walidacji tych modeli numerycznych w zakresie: funkcji rozwoju ciepła hydratacji cementu, funkcji temperatury i wielkości energii, aktywacji oraz funkcji opisującej rozwój właściwości mechanicznych betonu, odkształceń skurczowych i odkształceń pęczania.

Godne uwagi są rozważania autora na temat funkcji temperatury i energii aktywacji betonu. Funkcja temperatury betonu wskazuje na wpływ temperatury dojrzewania T na szybkość reakcji fizycznych w betonie:

$$f(T) = \frac{k_T}{k_{T_a}}$$

gdzie k_{T_a} jest tą szybkością w temperaturze normalnej T_a , którą przyjmuje się zazwyczaj na poziomie $20\text{ }^\circ\text{C}$. Nad właściwym zapisem funkcji $f(T)$ pracowało wielu badaczy, wśród których należy wymienić Rastrupa, który funkcję $f(T)$ oparł na znanej w chemii fizycznej regule Van't Hoffa, która mówi, że przyrost temperatury reakcji o $10\text{ }^\circ\text{C}$, podwaja szybkość tej reakcji, co wyraża wzór:

$$f(T) = 2^{\frac{T-T_a}{10}}$$

W późniejszych pracach Rastrup dostrzegł, że reakcje twardnienia betonu nie są tylko chemiczne, ale i fizyko-chemiczne, związane z wiązaniem wody zarobowej na granicy jon-dipol i dipol-dipol i wprowadził 2 modyfikacje tego wzoru:

$$\text{I) } f(T) = 2^{\frac{T-T_a}{t_{ya}}}$$

gdzie $t_{ya} = 10 \div 15\text{ }^\circ\text{C}$

$$\text{II) } f(t) = 2^{\frac{T-T_a}{10} \cdot \frac{T_a+T_a+78}{T+78}}$$

gdzie: $78\text{ }^\circ\text{C}$ - według Powersa temperatura zamrażania wody półzwiązanej w porach betonu.

Autor niniejszej recenzji w swojej pracy habilitacyjnej (1971 r.) wyprowadził termodynamiczną interpretację funkcji temperatury w postaci:

$$f(T) = e^{\frac{U_a T_2 - U_2 T_a}{k T_a T_2}}$$

gdzie:

- U_a, U_2 - wartości progów potencjału w kamieniu cementowym tężącym w warunkach normalnych (T_a) i w temperaturze podwyższonej (T_2),
- k - stała termodynamiczna Boltzmanna, równa $1,38 \cdot 10^{-16}$ ergów/K.

Wszystkie wymienione prace wykazały, że wraz ze wzrostem temperatury T_2 szybkość procesu hydratacji (a więc i wydzielania ciepła hydratacji cementu) ulega pewnemu wyhamowaniu w wyniku oporu jaki stwarzają już zhydratyzowane otoczki ziarn cementu. Stąd

podstawa potęg we wzorach Rastrupa powinna ulegać – ze wzrostem temperatury T_2 – zmniejszeniu, do wartości około 1,4÷1,5 przy $T_2 = 80$ °C. Tzw. ekwiwalentny wiek betonu t_e wynosi – przy wykorzystaniu wartości funkcji temperatury $f(T)$:

$$t_e = \frac{t}{f(T)}$$

gdzie:

t - czas dojrzewania betonu w temperaturze I ,

Do analizy powyższego zjawiska zastosował autor znaną w chemii fizycznej koncepcję Arrheniusa na tzw. ekwiwalentny wiek betonu t_e , a to:

$$t_e = \int_0^t \exp \frac{E_k}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T} \right) dt$$

gdzie:

E_k - energia aktywacji [J/mol],

R - uniwersalna stała gazowa, równa 8,314 [J · mol · k],

T - temperatura [K].

Wzór ten znalazł również zastosowanie w Eurokodzie 2. Ma on jednak podobne ograniczenie jak wcześniej opisane postacie funkcji temperatury $f(T)$. Stwierdził to zresztą sam autor, wykazując niedobre dopasowanie krzywych doświadczalnych $Q_h(t)$ i krzywych obliczeniowych wg Arrheniusa-Schindlera dla CEM I 42,5 R + (50÷70 %) dodatkowo FA (popiół lotny) i GGBFS (granulowany żużel wielkopiecowy). Co prawda autor rozpatruje energię aktywacji tylko w zakresie dwóch temperatur $T_a = 20$ °C i $T_2 = 50$ °C, ale dobrze byłoby, aby w dalszych pracach zbadał to zjawisko i w innych zakresach temperatury. Warto byłoby to zrobić, bo na koncepcji Arrheniusa przy założeniu stałej wartości energii aktywacji, opiera się szereg interpretacji zjawisk fizyczno-chemicznych spotykanych w praktyce budowlanej.

Niezależnie od tego, co wyżej powiedziano, rozważania autora na temat energii aktywacji E_k w betonach na różnych cementach zasługują na b. wysoką ocenę. Dobrze się stało, że oprócz koncepcji Arrheniusa obliczył autor energię aktywacji $E_k(T)$ również według dość dobrze sprawdzonego w praktyce wzoru Freislebena-Hansena-Pedersena, uzyskując wówczas b. dobre dopasowanie krzywych doświadczalnych $Q_h(t)$ z dawnymi obliczeniami, praktycznie dla wszystkich rodzajów rozpatrywanych w pracy spoiw.

Po walidacji programu TEMWIL w oparciu o pomiary rozwoju temperatury twardnienia w betonowej kostce 40 x 40 x 40 cm, odpowiednio zaizolowanej otrzymał autor krzywe temperatury twardnienia bardzo zgodne z wynikami badań doświadczalnych. Podobnie dobrą

zgodność uzyskał autor dla odkształceń skurczowych i pełzania betonu, a także w zakresie właściwości mechanicznych betonu.

W tym ostatnim przypadku rozważył autor modele oparte o proste funkcje matematyczne, jakie podaje np. Eurokod 2, oraz w oparciu o modele bardziej złożone oparte na stopniu hydratacji cementu.

W przypadku pierwszych modeli uzyskał dobre dopasowanie krzywych doświadczalnych i obliczeniowych dla temperatury dojrzewania $T_a = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ – po znaczącym skorygowaniu wartości współczynnika s do wzoru na $\beta_{cc}(t)$ dla poszczególnych, zbadanych cementów.

W drugim przypadku, przy walidacji modelu ujmującego wpływ temperatury na rozwój wytrzymałości na ściskanie w oparciu o stopień hydratacji cementu, uzyskano również dobrą zgodność dla dłuższych od $t = 24\text{ h}$ czasach dojrzewania, za wyjątkiem betonu z cementem VLH V/B (S-V) 22,5 (różnice rzędu 50÷30 %).

W końcowych fragmentach rozdziału 6 przedstawił autor interesujące wyniki obliczeń numerycznych dla masywnej płyty fundamentowej o wymiarach 20,0 x 20,0 x (1,0; 2,0; 3,0 i 4,0) m współpracującej z gruntem na obszarze 30,0 x 30,0 x (3,0÷6,0) m oraz dla ściany żelbetowej o długości 20,0 m, wysokości 4,0 m oraz grubościach 0,5 i 1,5 m, współpracującej z fundamentem o przekroju 4,0 x 1,0 m.

W obliczeniach tych, przy wykorzystaniu wyników własnych badań doświadczalnych i przeprowadzonych walidacji modelu, uwzględnił różne rodzaje cementów i kruszyw w analizowanych konstrukcjach, uzyskując interesujące wnioski końcowe, które stanowią rekapitulację realizacji głównych tez ocenianej pracy doktorskiej.

W oparciu o powyższą obszerną analizę należy stwierdzić, że opiniowana praca doktorska posiada wysokie walory naukowe i stanowi istotny wkład autora do rozwoju dyscypliny naukowej budownictwo, ze szczególnym uwzględnieniem technologii betonu i technologii betonowania żelbetowych konstrukcji masywnych i o średniej masywności.

2.4. Ocena zastosowanej metodyki badań

Zastosowane przez autora metody badań doświadczalnych oraz metodyka ich interpretacji i wykorzystania w zagadnieniach praktycznych nie nasuwają zastrzeżeń. Zastosowana aparatura jest nowoczesna i odpowiada standardom światowym, wymaganych przez stosowne normy czy rekomendacje. Wykorzystany aparat numeryczny należy do unikalnych w skali Polski.

3. Ocena strony formalnej pracy

Praca napisana jest starannie, dobrą polszczyzną. Rysunki i wykresy są czytelne i b. dobrze opisane. Drobne usterki formalne zaznaczono w tekście, natomiast większe zestawiono poniżej:

- Str. 8⁷ - należałoby dodać jeszcze: fundamenty pod maszyny, ścianowe przyczółki i filary mostowe,
- Str. 15 rys. 2,3 – nie uwidoczniło trzeciego maksimum,
- Str. 19₈ - dodać: wykazał,
- Str. 19₂ - te liczby można byłoby zakwestionować, dawniej podawano liczby około 2 x mniejsze,
- Str. 21⁶, 73², 76¹, 78¹ - powinno być: temperatury (obowiązuje tylko liczba pojedyncza),
- Str. 56 - nic nie wiadomo o konsystencji mieszanek betonowych, czy wszystkie betony były urabialne, czy stosowano dodatki upłynniające,
- Str. 57₈ - dodać: we wnętrzu,
- Str. 72 - warto byłoby zdefiniować pojęcie pojemności cieplnej betonu,
- Str. 81 - jak wyglądała i jak długo trwała pielęgnacja próbek,
- Str. 83₁ - w stosunku do czego?
- Str. 84 tab. 5.17 – dlaczego nie podano wytrzymałości f_{c28} dla próbek?
- Str. 84 p. 5.8.2 – dodać: przy zginaniu i dalej konsekwentnie w wierszach 13 i 14 od dołu,
- Str. 88₁₋₄ - o jaki współczynnik odkształcalności tu chodzi?
- Str. 93_{16,17} - zbędna część zdania,
- Str. 97 tab. 6.2 - wartość średnia → z jakiego zakresu $Q(t)$?
- Str. 106 p. 6.2.2., 106₂ - powinno być: temperatura,
- Str. 107₁ - w jaki sposób uwzględniono wilgotność młodego betonu i zmienny stopień hydratacji?
- Str. 108_{1,2} - nieściśle, również część skurczu od wysychania jest inna,
- Str. 110 wzór 6.38 - błędny, opuszczono „exp”,
- Str. 115 - chyba nie jest prawdą, że stopień hydratacji nie zależy od temperatury,
- Str. 116 - jest: (6.41); ma być (6.51),
- Str. 117³ - jest: 1,7; ma być: 0,17,
- Str. 117 rys. 6.14 - jaką wartość przyjęto za $\alpha(\tau)$ do wzoru (6.50) wobec dużej niezgodności $Q(\tau)$ na rys. 6.13 d i e?
- Str. 120 tab. 6.38 – nie ustosunkowano się do współczynnika wymiany ciepła dla dolnej powierzchni,
- Str. 121 - lepiej byłoby zapisać grubości z większą ilością cyfr znaczących, np. 1,0, 2,0 itd.

Str. 126 rys. 6.20 c – ma być: temperatury,
Str. 132⁶, 141₇ -
Str. 128₃, 129₁₉ - ma być: temperatury maksymalnej,
Str. 136⁸
Str. 130 tab. 6.42 – ma być temperaturę.

4. Uwagi krytyczne

- 4.1. Dlaczego wytrzymałości betonu na ściskanie uzyskane na próbkach kostkowych 10³ cm uznano za wartości wytrzymałości betonu na ściskanie $f_{c,cube}$ w rozumieniu normy PN-EN 1992 czyli dla próbek kostkowych 15³cm. Gdyby wprowadzono tu odpowiedni współczynnik korekcyjny to proponowane przez autora wartości skorygowanych współczynników s do wzoru (6.38) byłyby inne. Miałyby to wpływ również na wzór (6.42) na s_{corr} .
- 4.2. Dlaczego wytrzymałości betonu na rozciąganie przy zginaniu $f_{ct,fl}$ uznano za równoznaczne z wytrzymałościami f_{ct} w rozumieniu normy PN-EN-1992. Przecież $f_{ct} \cong 0,5 f_{ct,fl}$, natomiast dużo bliższe wartościom f_{ct} są wartości wytrzymałości betonu na rozłupywanie: $f_{ct} \cong 0,9 f_{ct,sp}$. Przyjęte w pracy, błędne powyższe założenie ma duży wpływ na wartości wyciężenia betonu w analizowanych konstrukcjach masywnych w tabelach 6.45 i 6.47.
- 4.3. W rozdziale 5.4 podano, że badania przewodności cieplnej i ciepła właściwego betonu przeprowadzono na próbkach wysuszonych w 105 °C do stałej masy. Dalej, że w tab. 5.12 i 5.13 przedstawiono te wyniki dla betonu w stanie powietrzno-suchym. Jak przeliczono te wyniki ze stanu suchego i czy wyniki dla stanu powietrzno-suchego są miarodajne dla dalszych obliczeń, kalibracji i walidacji, które powinny odpowiadać konstrukcjom masywnym jakie występują w praktyce budowlanej tj. funkcjonującym przy wilgotności względnej powietrza RH = 70÷80 %.
- 4.4. Zapis na str. 81 w p. 5.7 jest niezrozumiały. 1/3 siły niszczącej uzyskanej z badania wytrzymałości na ściskanie próbek kostkowych 10³ cm nie jest równoznaczna z 1/3 siły niszczącej, uzyskanej na pryzmach 10 x 10 x 50 cm. Jest to tzw. wytrzymałość słupowa, niższa od wytrzymałości kostkowej o około 25 %.
- 4.5. Niejasno w pracy zdefiniowano pojęcie gradientu temperatury. Matematyczna jest to pochodna $\frac{\partial T}{\partial x} \left[\frac{^{\circ}C}{m} \right]$ do pola temperatury „T” w kierunku normalnej do powierzchni „x”.
- Gradient ten jest zmienny na głębokości elementu, przy samonagrzewie od ciepła

hydratacji betonu jest największy przy powierzchni elementu i maleje w głąb. W rozwiązaniach praktycznych w technologii masywów betonowych określa się go najczęściej jako gradient średni na głębokości od $x = 0$ do $x = 1,0$. Wymaga się, aby ten gradient $\frac{\Delta T}{1,0} \leq 20 \text{ }^\circ\text{C/m}$. Natomiast przy grubszych masywach (płytach, ścianach) przyjmowanie za gradient różnicy temperatury między środkiem masywu a jego powierzchnią – jest błędne.

- 4.6. W przykładzie obliczeniowym pkt. 6.1 założono symetryczne warunki brzegowe, a takie one nie są. Inne są współczynniki przejmowania ciepła i wilgoci przez powierzchnię górną i dolną. Jak duży błąd tu popełniono?
- 4.7. Analizy przeprowadzone przez autora na str. 69 akapit 1 i 2 są za drobiazgowe. Porównywanie ciepła hydratacji cementów po 12 godzinach dojrzewania nie ma większego znaczenia. Co innego z porównywaniem po 72 h dojrzewania.

5. Wniosek końcowy

Opiniowaną pracę doktorską oceniam b. wysoko. Ma ona wszystkie cechy pożądanej rozprawy, a to tezy naukowe, metodykę naukową i wnioski naukowe. Doktorant wykazał dużą wiedzę, pracowitość, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia badań i analiz naukowych. Wyniki badań doświadczalnych zweryfikował korzystnie przy pomocy dostępnych modeli komputerowych.

W związku z tym uważam, że opiniowana praca doktorska mgr inż. Macieja Batoga pt.: „Kształtowanie składu mieszanki betonowej z uwagi na wczesne wpływy termiczno-skurczowe w betonowych konstrukcjach masywnych stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz istotny wkład w rozwój dyscypliny budownictwo, ze szczególnym uwzględnieniem technologii betonu i technologii wykonawstwa betonowych budowli masywnych.

Praca ta spełnia wszystkie warunki określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami), w związku z czym stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

