Dr hab. inż. Anna Halicka, prof. PL

POLITECHNIKA ŚLĄSKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA w Gliwicach

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Agnieszki Knoppik-Wróbel

pt.

"ANALYSIS OF EARLY-AGE THERMAL-SHRINKAGE STRESSES IN REINFORCED CONCRETE WALLS"

przygotowanej pod kierunkiem dr hab. inż. Barbary Klemczak, prof. PŚl

1. Problem naukowy i charakter dysertacji

Tematem recenzowanej rozprawy są naprężenia w ścianach żelbetowych powstałe w wyniku wczesnych odkształceń skurczowo-termicznych.

Skurcz betonu oraz efekty termiczne związane z samoociepleniem w wyniku hydratacji cementu i późniejszym jego stygnięciem są nieodłącznymi zjawiskami towarzyszącymi dojrzewaniu betonu, zachodzącymi w stadiach realizacyjnych konstrukcji. W ich wyniku w konstrukcji pojawiają się naprężenia wynikające ze skrępowania swobody odkształceń termiczno-skurczowych przez wykonane wcześniej fragmenty konstrukcji oraz naprężenia nierównomierne na grubości elementu. Naprężenia te mogą osiągać znaczne wartości, skutkujące zarysowaniami, zwłaszcza, że beton jest jeszcze niedojrzały.

Takie właśnie rysy są realnym problemem w ścianach zbiorników żelbetowych, reaktorów atomowych, tuneli, oraz w ścianach oporowych i przyczółkach mostów. Zarysowane konstrukcje wymagają napraw, opóźniających termin oddania obiektu do eksploatacji i zwiększających koszty realizacji inwestycji. Zatem temat rozprawy doktorskiej uznaję za aktualny i bardzo ważny z punktu widzenia praktyki.

Praca ma charakter analityczny – jej istotą są analizy numeryczne. Narzędziem tych analiz jest autorskie oprogramowanie, będące adaptacją i twórczym rozwinięciem istniejących modeli numerycznych.

Za cel pracy doktorantka postawiła ustalenie wielkości i rozkładu naprężeń skurczowo-termicznych generowanych w ścianach żelbetowych w młodym wieku. Podkreślić trzeba, że podjęty problem naukowy jest niezwykle złożony. Numeryczny opis zjawisk w dojrzewającej ścianie betonowej jest bardzo skomplikowany ze względu na konieczność uwzględnia sprzężenia „temperatura – wilgotność – zachowanie mechaniczne" analizowanej konstrukcji oraz na niejednorodność konstrukcji (konieczność uwzględnienia trzech składników o różnych charakterystykach: ściany, fundamentu i podłoża).

2. Zawartość i układ dysertacji

Praca napisana została w języku angielskim. Liczy 138 stron tekstu podstawowego, do którego dołączono spis treści, spisy rysunków i tabel, spis oznaczeń, spis literatury zawierający 237 pozycji oraz streszczenie. Do pracy dołączony jest też suplement, w którym doktorantka podała najważniejsze wątki pracy w języku polskim oraz zamieściła kopie swoich czterech najważniejszych anglojęzycznych publikacji.

W pracy wyróżnić można następujące części:

1. Część wstępną zawierającą cel i zakres pracy (p.1);
2. Studia literaturowe (p.2,3,4), których przedmiotem są:
   - zjawiska zachodzące w ścianach żelbetowych w młodym wieku, w tym charakterystyka młodego betonu (p.2.2), istota naprężeń termiczno-skurczowych (p.2.3) oraz zestawienie prezentowanych w literaturze przykładów uszkodzeń konstrukcji żelbetowych powstałych w wyniku tych naprężeń (p.2.4),
   - metody, w tym normowe, pozwalające na obliczenie odkształceń (p.3.1) i naprężeń (p.3.2) skurczowych i termicznych w ścianach oraz uwzględnienie wpływu pełzania i starzenia betonu (p.3.3),
   - sposoby modelowania ścian żelbetowych w młodym wieku, w tym modelowanie młodego betonu uwzględniające stopień dojrzałości (p.4.1), modelowanie gruntu (p.4.2) oraz zbrojenia (p.4.3),
3. Studia i analizy własne:
   - opis modeli numerycznych, na których oparto model autorski (p.5.1),
   - opis autorskiego modelu pełnej numerycznej analizy termiczno-skurczowej ścian z betonu w młodym wieku - p.5.1.2,
   - zastosowanie autorskiego modelu numerycznego do analizy ściany reaktora w elektrowni atomowej oraz ściany tunelu - p.5.2,
   - analiza parametryczna wpływu wymiarów ściany oraz parametrów podłoża na ryzyko zarysowania pod wpływem wczesnych naprężeń termiczno-skurczowych - p.5.3,
   - rozważania na temat wpływu na wczesne naprężenia w ścianach takich czynników jak skład mieszanki betonowej, warunki środowiskowe, czynniki technologiczne - p.5.4,
4. Wnioski końcowe wraz ze wskazaniem kierunków dalszych prac – p.6.
5. Spis literatury zawierający w większości pozycje anglojęzyczne, a także pozycje polskie - 24 i francuskie – 2 , w tym 13 norm i instrukcji. Znajduje się tu też 11 prac doktorantki pisanych we współautorstwie z promotorem oraz trzy prace samodzielne.

3. Merytoryczna ocena pracy

3.1 Ocena ogólna rozprawy

Recenzowana rozprawa wskazuje na kompetencję doktorantki i umiejętność twórczego rozwijania wiedzy. Widoczna jest konsekwencja działań – od literaturowego rozpoznania tematu, poprzez analizę istniejących modeli numerycznych do sformułowania w oparciu o nie modelu własnego. Stworzony autorski model został z powodzeniem zastosowany do analizy realnych konstrukcji i do badań parametrycznych. Model był sukcesywnie rozwijany – w pierwszych przykładach zamodelowano posadowienie konstrukcji w formie podparcia, a następnie rozbudowano go o model podłoża gruntowego.

Ogólnie można stwierdzić, że został podjęty i rozwiązany skomplikowany problem naukowy.

Szczegółowa ocena merytoryczna dysertacji zostanie przedstawiona poniżej poprzez ocenę poszczególnych jej części.

3.2 Ocena części studialnej

Zagadnienia poddane studiom literaturowym należy uznać za właściwe, także zakres tych studiów jest prawidłowy, a wybrane przykłady konstrukcji zarysowanych w młodym wieku są adekwatne. Cenne jest zestawienie metod szacowania wczesnych naprężeń w ścianach betonowych, zalecanych przez różne źródła i normy. Z kolei szerokie i kompetentne opisy modeli przepływu ciepła i wilgoci oraz innych zjawisk zachodzących w młodym betonie oraz dotychczasowych modeli numerycznych są odpowiednią podstawą do własnych badań i analiz, gdzie zostały wykorzystane.

Uwagi szczegółowe:

- Str.$12_{14\text{-}13}$ – napisano, że często w styku fundamentu i ściany stosuje się taśmy uszczelniające „...ale częściej styk fundamentu i ściany jest monolityczny...". Styk nie może być określany jako monolityczny – jest miejscem nieciągłości konstrukcji. To konstrukcja jest monolityczna (lub raczej w przypadku istnienia styku – „quasi-monolityczna"), a wprowadzenie taśmy nie zmienia tego faktu (taśma jest prostopadła do styku).
- Str.$12_{5\text{-}4}$ – nieścisłością jest stwierdzenie, że według klasyfikacji Eurokodu 2-3 w klasach szczelności 2 i 3 rysy są nieakceptowalne. Pojawienie się rys nieprzelotowych w tych klasach jest dopuszczalne, natomiast jeśli jest możliwość pojawienia się rys przelotowych należy zastosować okładziny wewnętrzne (klasa 2) lub sprężenie (klasa 3).
- We wzorze 3.34 powinno być $(1\text{-}R_M)$ zamiast $(1+R_M)$.

- W opisie wyrażenia 3.46 opisano, że podaje ono wartość naprężeń przyczepności (*bond stress*). Tymczasem opisuje ono naprężenia, które powstają w styku w wyniku odkształceń skurczowo-termicznych, a naprężenia przyczepności są reakcją na te naprężenia.

  Ponadto kilka wierszy niżej utożsamiono wytrzymałość wynikającą z przyczepności (*bond strength*) z wytrzymałością styku na ścianie (wzór 3.47) Pamiętać trzeba jednak, że naprężenia przyczepności to naprężenia przeciwstawiające się wszelkim próbom rozdzielenia połączonych elementów. Dlatego nie można mówić o uniwersalnej przyczepności, ale o wytrzymałości styku na ścinanie, rozciąganie lub na złożony stan naprężenia.

  I dalej: w opisie wzoru (3.49) powinno być *shear force* a nie ax*ial force.*
- W tablicy 4.12 zestawiono ciężary objętościowe różnych kruszyw. Wszystkim kruszywom przypisano stałe i jednakowe wartości, podczas gdy są one zróżnicowane (np. bazalt - 2500÷3100 kg/m^3, dolomit 2200÷2600 kg/m^3). Ponadto podając te wartości powołano się na normę EN 206-1, w której wartości ciężarów kruszyw nie są podane.

3.3 Ocena części analitycznej

Niewątpliwym osiągnięciem doktorantki jest stworzenie modelu numerycznego (rys.5.1) pozwalającego na kompletną analizę odkształceniowo-naprężeniową ścian żelbetowych betonowanych na wykonanym wcześniej fundamencie, uwzględniającą także współpracę z gruntem. Model ten jest oparty na dwóch istniejących modelach: modelu autorstwa B.Klemczak w zakresie analizy termiczno-wilgotnościowej oraz modelu S.Majewskiego i B.Klemczak w zakresie analizy naprężeń. Jest ich twórczym rozwinięciem.

Stworzony program komputerowy zawiera kilka modułów: zaimplementowany moduł MAFEM3D do tworzenia siatki elementów skończonych, moduły do przygotowywania danych (takich jak funkcja hydratacji, właściwości materiałowe czy parametry zadania), moduł TEMWIL (oparty na modelu B.Klemczak), moduł MAFEM (oparty na modelu S.Majewskiego) oraz otwarto-źródłowa aplikacja PARAVIEW służąca do graficznego przedstawiania wyników obliczeń. Program został napisany przy użyciu języka FORTRAN 90 i może pracować zarówno w środowisku Windows jak i Linux.

Autorski program został użyty do analizy rzeczywistych ścian: masywnej ściany w elektrowni atomowej oraz wykonywanej etapowo ściany tunelu. Przy jego użyciu doktorantka ustalała w pierwszym etapie przebieg zmienności temperatur oraz zawartości wilgoci w punktach odpowiadających usytuowaniu termopar w ścianach rzeczywistych. Przebieg obliczonych temperatur był zgodny z przebiegiem rzeczywistym w fazie samonagrzewu,

natomiast obliczone temperatury były wyższe niż rzeczywiste w fazie studzenia. Doktorantka tłumaczy ten fakt przyjętą postacią funkcji rozwoju ciepła hydratacji. Stwierdza także, że z powodu uwzględnienia jedynie skurczu autogenicznego nie zaobserwowała różnic wilgotności między wnętrzem a powierzchnią ściany. W drugim etapie autorka sporządziła mapę współczynników wytężenia ściany ujawniając strefy o wytężeniu równym 1, które dobrze pokrywają się z miejscami rzeczywistych rys w konstrukcji. Zatem można uznać, że autorski model numeryczny w dobrym stopniu modeluje rzeczywistość.

Następnie przy użyciu autorskiego modelu doktorantka wykonała analizy parametryczne określając:

- wpływ wymiarów ściany na stopień utwierdzenia na rożnych wysokościach ścian (stopień utwierdzenia zdefiniowała jako stosunek normalnych naprężeń poziomych w danej ścianie do takich samych naprężeń przy pełnym utwierdzeniu), uzyskane wartości porównała z obliczonymi przy pomocy metod ACI oraz LULEA i wyprowadziła bardzo ważny wniosek, że rozkłady naprężeń w ścianie w młodym wieku zależą nie tylko od stosunku L/H (co zakłada metoda ACI), ale także od jej długości,
- wpływ warunków gruntowych – doktorantka stwierdziła, że w przypadku ścian krótkich podatność gruntu nie ma wpływu, ale przy ścianach długich posadowionych na gruncie podatnym poziome naprężenia rozciągające są mniejsze niż w przypadku gruntu mniej podatnego.

W ostatnim rozdziale autorka streściła wyniki analiz parametrycznych, relacjonowanych szczegółowo w jej wcześniejszych publikacjach [148] i [139]. Analizy te dotyczyły wpływu składu betonu, w tym rodzaju i ilości cementu na stopień wytężenia ściany, a także wpływu temperatury otoczenia i temperatury układanej mieszanki betonowej oraz izolacyjności deskowań i czasu ich usunięcia. Pewną trudnością w czytaniu tego rozdziału jest fakt, że znajdują się tu jedynie końcowe rezultaty obliczeń bez dokładniejszego opisu analizowanych konstrukcji np. geometrii ściany.

Przedstawiony wyżej zakres analiz numerycznych jest bardzo szeroki. Przeanalizowano większość z istotnych czynników wpływających na możliwość wczesnych zarysowań skurczowo-termicznych ścian żelbetowych.

Uwagi szczegółowe:

- Ze względu na ogromną złożoność zagadnienia konieczne i zrozumiałe są pewne uproszczenia, takie jak uwzględnienie jedynie autogenicznej części skurczu (str. 97^{6-7}). Uproszczenie to jest zasadne tylko, o ile deskowanie zabezpiecza beton przed wymianą

wilgoci z otoczeniem. W modelu tymczasem wymianę wilgoci z otoczeniem uwzględniono, przyjmując współczynnik β_p. Jest to więc pewna niespójność.

- Rys.5.8 – na rysunku 5.8 a) pokazano, że w ścianę etapu 1 wbudowano 6 termopar, a na rys. 5.8 b) pokazano wyniki pomiarów temperatury jedynie na 4. Czy wyniki na pozostałych były niedostępne? Interesujący byłby również rozkład na dwóch pozostałych (#5 wskazałaby na to, czy wystąpiła spodziewana symetria w stosunku do termopary #1, a #6 wskazałaby wpływ braku zabezpieczenia powierzchni deskowaniem).
- Z rysunku 5.9 wynika, że w modelu przyjęto nieciągłe oparcie ściany na gruncie (w przeciwieństwie do rysunku zawartego w studiach literaturowych opisujących modele posadowienia konstrukcji). Nie podano czy przyjęto podłoże nieodkształcalne, czy podatne.
- Niepokoi nieco przyjęta w tablicy 5.3 (5.7) wartość współczynnika λ = 3,0 W/(mK). Dla betonu dojrzałego jest ona zdecydowanie niższa (np. beton zwykły na kruszywie kamiennym wg PN-EN 12524 – 1,15 do 2,0 W/(mK), wg PN-EN ISO 6946 od 1,0 do 1,7 W/(mK), przy czym dla betonu o gęstości 2200 kg/m^3 jest to 1,30). Co prawda w przykładzie rozważany jest beton młody, ale według powoływanej tu pracy [130] współczynnik przewodzenia ciepła zmienia się wyraźnie jednie przez pierwsze 4-6 godzin (a wiec w fazie ocieplania, a nie studzenia) i przy braku dokładniejszych danych należy go przyjmować jako 1,5. Ponadto tu zastosowano kruszywo otoczakowe - nie podano jakiego typu, ale sądząc po gęstości 1841kg/m^3 jest to kruszywo lekkie, a przy kruszywach lekkich λ jest z reguły niższe (np. przypadku betonu na lekkim kruszywie wapiennym - wg PN-EN ISO 6946 od 0,5 do 0,72).
- Na jakiej podstawie przyjęto wartości współczynników wymiany ciepła z otoczeniem? Czy wartości współczynników wymiany ciepła i wilgoci z gruntem w przykładach p.5.2.1 i 5.2.2 były przyjmowane w takich samych wartościach jak współczynniki wymiany z otoczeniem?
- Czy wartość *s* w tablicy 5.8 jest rzeczywiście współczynnikiem kształtu, a nie współczynnikiem rodzaju cementu?
- Na rys. 5.11 widoczne są czarne strefy wytężenia na końcach styku ściany i płyty dennej. W tych miejscach nie zanotowano rys w rzeczywistości (rys.5.12) Jak należy ten fakt interpretować?
- Na rys.5.27b) pokazano zmienność „współczynnika odkształceń termicznych" na głębokości fundamentu. Ze wzorów 5.39÷-5.41 wynika, że jest on obliczony jako

stosunek różnicy odkształceń termicznych ściany i dna na danej głębokości do odkształceń termicznych ściany, ale są to wartości odkształceń swobodnych. Powinno to być jasno opisane w podpisie rysunku, bowiem odkształcenia swobodne nie mają realnego odzwierciedlenia w konstrukcji, gdzie zachodzą odkształcenia nieswobodne.

- W analizie parametrycznej (na rys. 5.29 i dalszych) za podstawowy parametr, który może być stosowany we wnioskowaniu o możliwości zarysowania przyjęto stopień utwierdzenia σ_{fix}, definiowany jako stosunek naprężeń poziomych do naprężeń pełnego utwierdzenia. Pozwala on zatem na analizowanie przypadków zarysowań pionowych. W praktyce w ścianach o swobodnych krawędziach pionowych (jak w ścianach analizowanych) istnieje także niebezpieczeństwo zarysowań poziomych w styku ściany i dna, a w ścianach utwierdzonych na końcach istotne są nie tyle naprężenia poziome, ale główne. Lepszym zatem wskaźnikiem w przypadku ogólnym jest używany wcześniej „stopień wytężenia". Ponadto naprężenia pełnego utwierdzenia służące do obliczenia ww. współczynnika przyjęto jako σ_{fix} = 1,5 MPa (str. 117_7). Nie wyjaśniono jednak na jakiej podstawie wartość ta została przyjęta.
- Na rys. 5.37 pokazano wykres współczynników wytężenia w czasie dojrzewania betonów o różnym składzie, w tym bazujących na różnych cementach. Jedynie w jednym przypadku współczynnik ten jest nieco większy niż 60%. Oznacza to, że w analizowanej ścianie rysy pionowe nie pojawią się niezależnie od przyjętych składów betonu. Analizując ten rysunek na str. 128 autorka podaje, że ukazuje on „ryzyko zarysowania" i, że każde 50 kg cementu powoduje „wzrost ryzyka zarysowania o 7%". Tymczasem, zgodnie z definicją współczynnika (wzór na str. 95) ryzyko takie nie istnieje, bo współczynnik jest niższy niż 100%. Rośnie po prostu stopień wytężenia.

3.4 Ocena wniosków pracy

Doktorantka sformułowała 4 grupy wniosków dotyczące: charakteru naprężeń i rys w ścianach betonowych w młodym wieku, modelowania zachowania młodego betonu, wpływu warunków utwierdzenia na wczesne naprężenia w ścianach betonowych oraz wpływu wybranych parametrów na te naprężenia. Wnioski odzwierciedlają zawartość pracy i wyniki przeprowadzonych analiz.

Doktorantka wytyczyła także kierunki udoskonalania modelu autorskiego w przyszłości poprzez uwzględnienie pełzania. Widzi także konieczność: analizy bardziej różnorodnych betonów, podejścia probabilistycznego przez uwzględnienie zmienności stosowanych parametrów, określania szerokości rozwarcia rysy. Chciałaby stworzyć uproszczony model

inżynierski. Recenzent sugeruje także uwzględnienie skurczu wysychania i analizę wpływu różnych charakterystyk deskowań (np. coraz bardziej popularnego stosowania okładzin wewnętrznych zbiorników z folii twardych mocowanych do ściany już na etapie wykonawstwa). Pożyteczna byłaby też analiza wpływu stopnia i rozmieszczenia zbrojenia oraz analiza ścian betonowanych etapowo pasami poziomymi oraz ścian zakrzywionych w planie.

4. Wniosek końcowy

Przedstawiona praca jest niewątpliwie dziełem oryginalnym.

Doktorantka podjęła się zadania ambitnego, które konsekwentnie rozwiązywała. Wykazała się wiedzą z zakresu podjętej tematyki i umiejętnością twórczego podejścia do zastanej wiedzy. Udowodniła umiejętność wykonywania zaawansowanych obliczeń numerycznych, twórczego analizowania ich wyników oraz wyprowadzania praktycznych wniosków. Podsumowując - praca świadczy o opanowaniu przez doktorantkę warsztatu badań naukowych.

Ostatecznie stwierdzam, że przedłożona praca mgr inż. Agnieszki Knoppik-Wróbel pt. „Analysis of early-age thermal-shrinkage stresses in reiforced concrete walls" spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. z późniejszymi zmianami „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki". Wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Lublin dn. 2.05.2015