

Dr hab. inż. Jerzy Pamin, prof. PK
Wydział Inżynierii Lądowej
Politechniki Krakowskiej
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
e-mail JPamin@L5.pk.edu.pl

Kraków, 28.08.2008

Recenzja
pracy doktorskiej mgr. inż. Witolda Węglewskiego pt.
Modelowanie zniszczenia betonu
wywołanego korozją siarczanową

1. Ocena trafności wyboru tematyki i ogólna charakterystyka pracy

Praca doktorska mgr. inż. Witolda Węglewskiego, będąca wynikiem badań prowadzonych pod kierunkiem doc. dr. hab. inż. Michała Basisty w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN, dotyczy tematyki trwałości betonu, priorytetowej w obecnych badaniach stosowanych w budownictwie. Autor zajął się zagadnieniem sprzężonym chemomechaniki, badając teoretycznie i numerycznie pewne aspekty destrukcyjnego wpływu siarczanów na beton, w szczególności na jego uszkodzenie i pękanie wywołane przez ekspansję uwodnionego siarczanoglinianu wapnia zwanego ettringitem.

Tematyka korozji betonu wywołanej agresywnym środowiskiem znajduje się od dawna wśród ważnych tematów badawczych w inżynierii lądowej. Prowadzone są kompleksowe analizy doświadczalne, teoretyczne i numeryczne modeli sprzężonych procesów fizycznych, zazwyczaj niestacjonarnych. Sprzężenia te obejmują pola fizyczne (przemieszczenia, temperatura, wilgotność) i chemiczne (stężenia związków szkodliwych). Trafności wyboru tematyki pracy dowodzą prowadzone obecnie badania w wielu zespołach za granicą, np. w Institut fuer Mechanik der Werkstoffe und Strukture, Technische Universitaet Wien (prof. Ch. Hellmich), Lehrstuhl fuer Statik und Dynamik, Ruhr Universitaet Bochum (prof. G. Meschke) czy Dipartimento di Costruzioni e Trasporti, Universita di Padova (prof. B. Schrefler), a także w kraju, np. w Katedrze Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych Politechniki Łódzkiej (prof. D. Gawin). Powstały w ostatnich latach cenne i kompleksowe prace obejmujące teoretyczno-obliczeniowy opis chemomechanicznej degradacji betonu, np. monografie habilitacyjne D. Kuhla (*Modellierung und Simulation von Mehrfeldproblemen der Strukturmechanik*, Ruhr-Universität Bochum, 2004) czy A. Winnickiego (*Viscoplastic and internal discontinuity models in analysis of structural concrete*, Politechnika Krakowska, 2008).

Praca doktorska mgr. W. Węglewskiego pt. *Modelowanie zniszczenia betonu wywołanego korozją siarczanową* obejmuje na 108 stronach 7 rozdziałów, bibliografię z 85 pozycjami literatury i dodatek zawierający wydruk procedury do analizy MES procesu transportu siarczanów i oszacowania mechanicznych skutków ekspansji ettringitu.

W rozdz. 1 przedstawione zostały motywacja badań, przegląd literatury nt. chemicznych aspektów korozji siarczanowej betonu oraz wzory na ciśnienie krystalizacji ettringitu, podczas której następuje wzrost objętości tego związku. W rozdz. 2 podane zostały cel i zakres pracy. Celem było zbudowanie modelu sprzężonego chemomechaniki dla określenia ilościowych skutków ekspansji ettringitu w dojrzałym betonie. W rozdz. 3 przy-

pomniane zostały podstawowe równania z teorii homogenizacji, opisana metoda równoważnej inkluzji, definicja reprezentatywnego elementu objętości i metoda wewnętrznie zgodna. Autor pokazał też, że koncepcja perkolacji pozwala na oszacowanie dwu progowych wartości skalarne parametru uszkodzenia (gęstości uszkodzeń). Jest to próg odpowiadający połączeniu mikroszczelin w ciągły kanał umożliwiający transport siarczanów przez materiał i próg odpowiadający zaawansowanej destrukcji, umożliwiającej natychmiastową dyfuzję tych związków.

Najważniejszy w pracy rozdział 4 jest poświęcony przedstawieniu modelu uszkodzenia betonu, wywołanego korozją siarczanową. Model ten obejmuje równanie niestacjonarnego procesu dyfuzji, określenie członu reakcyjnego w tym równaniu oraz oszacowanie odkształceń własnych objętościowych w kryształach ettringitu. Następnie analizowane jest tworzenie się mikroszczelin w wyniku rozpierania osnowy betonowej przez krystalizujący ettringit. Założono izotropowy rozkład okrągłych mikroszczelin i określono według pracy Mury (1987) efektywne moduły sprężystości oraz współczynnik dyfuzji jako funkcje parametru gęstości mikroszczelin. Na podstawie pracy Krajcinowica i in. (1992) przyjęto progi perkolacji. Następnie obliczone zostały efektywne odkształcenia i napeżenia w kontinuum wykazującym uszkodzenie i odkształcenia własne. Rozdział kończy się analitycznym i numerycznym rozwiązaniem przykładowego zagadnienia dwuwymiarowego. Przedstawione na Rys. 4.12-4.15 wyniki obliczeń, zawierające porównanie z eksperymentem, są przekonujące, choć niepokojące jest stwierdzenie na str. 68, że dla 7% zawartości glinianu trójwapniowego zaobserwowano rozbieżność wyników, podczas gdy dla 4.3% i 8.8% zgodność jest dobra.

W rozdz. 4 założono, że ekspansywny ettringit powstaje w reakcji topochemicznej, natomiast w rozdz. 5 analizowana jest możliwość jego powstawania w reakcji w roztworze. Ciśnienie krystalizacji ettringitu zostało wyznaczone na podstawie pracy Scherera (1999) przy użyciu obliczonego przez Autora numerycznie stężenia siarczanów, choć wyraża On opinię, że bardziej poprawne byłoby skorzystanie z podejścia Hofmana (2007), tylko brak danych dotyczących współczynnika ściśliwości to uniemożliwia. Ten fragment pracy został zresztą napisany dość niejasno i budzi wątpliwości: czy m jest funkcją, czy parametrem, jak ściśliwość może nie być funkcją ciśnienia, jak uzyskano równ. (5.15) z (5.14), w którym niewiadomą funkcją wydaje się być objętość V . Wewnętrznie sprzeczne jest też sformułowanie, że "aby zachować izochoryczność procesu należy zmniejszyć objętość". Jest to o tyle ważne, że przedstawione na Rys. 5.2 wyniki byłyby silnym argumentem w dyskusji, w jakiej reakcji powstaje ettringit, gdyby analiza reakcji w roztworze nie była obciążona wątpliwościami dotyczącymi stosowalności wzoru (5.12).

W rozdz. 6 przedstawiono analizę przypadku korozji siarczanowej w próbce ścisanej, co skutkuje ortotropią mikrozarysowań. Oszacowano współczynnik intensywności naprężeń, efektywne moduły Younga i współczynniki dyfuzji. Wyznaczono zależność współczynnika dyfuzji i wzrostu objętości próbki od wielkości obciążenia ścisającego. Wydaje się, że w tematyce tego rozdziału pozostało szerokie pole do badań. Rozdz. 7 zawiera zwięźle przedstawione wnioski z pracy. Autor podkreślił też oryginalne jej elementy. Zamiast (lub oprócz) listingu procedury obliczeniowej zawartego w załączniku, bardziej wartościowy dla czytelnika byłby schemat blokowy lub zapis algorytmu obliczeń w innej formie graficzno-tekstowej. Natomiast opis metody bisekcji jest niepotrzebny, bo ten algorytm jest trywialny i zawarty w każdej książce nt. metod numerycznych.

2. Ocena pracy, realizacji celu badań i oryginalnego wkładu autora

Różnorodność poruszonych problemów i poziom zaawansowania zastosowanych teorii i metod obliczeniowych uzasadnia opinię recenzenta, że jest to rozprawa na wysokim poziomie.

Punktem wyjścia do recenzowanej pracy był niewątpliwie rozdz. 6 monografii promotora (M. Basista: *Micromechanical and lattice modeling of brittle materials*, Prace IPPT PAN, 3/2001) zatytułowany *Chemo-micromechanics of brittle solids exposed to aggressive ambient*, który ukierunkował badania na analizę mikromechaniczną i homogenizacyjną, a ten aspekt znacznie podniósł poziom trudności rozważań.

Autor skupił się na analizie korozji wywołanej przez siarczan sodu i jej skutkach mechanicznych. Uwzględnił sprzężenie zwrotne polegające na wpływie pęknięcia na współczynniki dyfuzji. Podjął słuszną według recenzenta decyzję o ograniczeniu zakresu badań przez założenie odnośnie kształtu mikroszczelin i braku interakcji między nimi (małej gęstości uszkodzeń).

Założone w projekcie doktorskim cele zostały zgodnie z opinią Promotora zrealizowane. Oryginalne osiągnięcia mgr. W. Węglewskiego obejmują punkty wymienione przez Niego samego w uwagach końcowych: zbudowanie i oprogramowanie modelu chemomechanicznego korozji betonu przejawiającej się ekspansją ettringitu (przy czym podejście jest wystarczająco ogólne, aby je zastosować dla innych czynników agresywnych), analiza homogenizacyjna uszkodzenia będącego wynikiem korozji dla przypadku ciała bez obciążeń zewnętrznych i próbki jednoosiowo ściskanej, porównanie wyników z dostępnymi w literaturze danymi eksperymentalnymi.

Należy zaznaczyć, że tekst pracy nie jest w stanie oddać wysiłku włożonego w implementację i walidację własnego programu komputerowego. Wydaje się natomiast, że praca mogłaby zawierać większą liczbę przykładów testowych. Podsumowując, dysertacja zawiera wiele wątków o dużej wartości naukowej, które powinny być przedmiotem dalszych badań.

3. Uwagi o warsztacie naukowym i redakcji pracy

Zwraca uwagę wykazywana przez Autora wszechstronność: praca zawiera aspekty z różnych dziedzin, modelowanie ma charakter teoretyczno-obliczeniowy, Autor oprogramował analizowane równania tworząc oryginalne narzędzie do analizy numerycznej.

W pracy nie zostały sformułowane tezy, ale recenzent nie uważa tego za konieczny element dysertacji. Ważniejsze jest jasne sprecyzowanie celów pracy badawczej, ich zrealizowanie i poprawne opisanie, a to nie budzi znaczących zastrzeżeń w doktoracie mgr. W. Węglewskiego. Tytuł dysertacji oddaje precyzyjnie zawartość pracy. Układ pracy jest przemyślany, w większości staranna jest prezentacja teorii i wniosków z analiz.

Nie jest poprawnie użyte na str. 27 i 32 określenie "naprężenie zewnętrzne". Chodzi niewątpliwie o obciążenie przyłożone do powierzchni ciała (ang. *traction*). Wyprowadzenie warunku Hilla na str. 31-32 budzi pewne wątpliwości: ostatnia część wzoru (3.16) wydaje się być zapisana przedwcześnie, bo wówczas z porównania (3.16)₂ i (3.17)₁ wynika wprost (3.20). Jeśli każde pole przedstawić jako sumę wielkości uśrednionej i fluktuacji, wówczas niejasne jest, jak powstało równ. (3.17)₂. Wzór (3.19) dotyczy iloczynu uśrednionych fluktuacji, a nie "fluktuacji uśrednionych naprężeń i odkształceń".

Trudności sprawiło recenzentowi również prześledzenie wyprowadzenia na str. 57. Równ. (4.40) to warunek nierozdzielności (referencja do książki z 1960 r. wydaje się tu zaskakująca). Nie wiadomo, dlaczego scałkowanie tego równania daje wynik niezależny

od x - czy postać (4.41) może zależeć od kolejności całkowania po x i y , co to są "uśrednione warunki równowagi". Dalsze wyprowadzenie analityczne (granice całkowania) nie odpowiada niestety konfiguracji przykładu opisanego w rozdz. 4.6, w którym zresztą recenzent jako specjalista od metod obliczeniowych zauważył najwięcej niedociągnięć.

Nie jest w nim wyjaśnione, dlaczego Autor analizuje ćwiartkę prostopadłościanu (Rys. 4.9). Czemu w ostatnim członie wzoru (4.47) nie dokonano ubezwymiarowania stężenia c , por. wzór (6.43) w monografii Basisty? Czemu człon ten nie jest wyznaczany MES? Niepoprawnie zapisane są warunki brzegowe (4.50)₂. Nie skomentowano, dlaczego granice całkowania zmieniły się na od 0 do 1. Oczywiście v jest funkcją wagową w sformułowaniu słabym i ma interpretację wirtualnego stężenia. Dekompozycja w równ. (4.53) jest dla recenzenta niezrozumiała - zazwyczaj dokonuje się dyskretyzacji przestrzennej pola \tilde{c} i pola prędkości $\dot{\tilde{c}}$ (i oczywiście funkcji wagowej) w równ. (4.52). Brakuje wzorów dyskretyzacyjnych, zawierających funkcje kształtu N_i oraz przepisów na macierze we wzorach (4.58) i (4.59). Niepoprawny jest zapis równań macierzowych (4.60) i (4.61) - wektory lepiej zapisywać czcionką wyłuszczoną i trzeba uważać na kolejność mnożenia macierzy, a \mathbf{K} nie jest macierzą sztywności lecz raczej oporu dyfuzyjnego. Inne drobne uwagi redakcyjne zostały przekazane Autorowi dysertacji.

Praca napisana jest poprawnym językiem polskim. Autor słusznie podaje w nawiasach anglojęzyczną terminologię. Recenzent wyraża jednak wątpliwość, czy pracy w tak silny sposób związanej z najnowszymi badaniami nauki światowej nie należało zredagować w języku angielskim. Skoro Autor zdecydował się na język polski, oczekiwane jest opublikowanie wszystkich oryginalnych wątków pracy w artykułach do międzynarodowych czasopism (chyba, że praca przyjęta do druku w *International Journal of Damage Mechanics* ma kompleksowy charakter). Równocześnie można wyrazić opinię, że nowoczesne badania w projektach doktorskich powinny być szybciej publikowane w artykułach, które następnie stałyby się częściami dysertacji tak, jak dzieje się to np. w ośrodkach skandynawskich.

4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne, pytania do Autora

Poniżej podane są uwagi i wątpliwości recenzenta, dotyczące zawartości pracy i perspektyw rozwoju badań.

1. Przy określaniu odkształcenia własnego objętościowego wzorem (3.12) założono, że osnowa betonowa jest sprężysta. W jakim zakresie założenie to jest uprawnione?
2. W rozdz. 6.6.1 monografii habilitacyjnej Basisty całkowite odkształcenie własne uwzględnia efekt rozszerzalności cieplnej, a w recenzowanej dysertacji wpływ ten nie jest rozważany. Czy jest on pomijalny w analizowanym przypadku? Przy jakich założeniach może być pominięty?
3. W pracy stwierdzono na podstawie obserwacji mikrostruktury, że odkształcenia własne generujące uszkodzenie mają charakter objętościowy. Czy możliwe jest wystąpienie odkształceń dewiatorowych w wyniku destrukcyjnych procesów chemicznych i w jaki sposób skomplikowałyby to rozwiązanie problemu? Innymi słowy, czy opracowana teoria dałaby się zastosować, gdyby ε_{ij}^r we wzorze (4.20) nie był tensorem kulistym?
4. W rozdz. 6 rozważana jest konfiguracja ściskana obciążeniem powierzchniowym, a uszkodzenie mechaniczne betonu w postaci mikro- i makrozarysowań jest zazwy-

czaj wywołane naprężeniami rozciągającymi. Co zmienia się w zaproponowanym modelu, jeśli próbkę poddamy zewnętrznemu rozciąganiu? Nieco zaskakujące jest w przedstawionej analizie, że "moduł Younga w kierunku x_3 nie zmienia się wraz ze wzrostem gęstości uszkodzeń", bo w takim razie dlaczego zmienia się współczynnik dyfuzji D_{33} ?

5. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że recenzowana praca doktorska spełnia wymagania określone w art. 13 ustawy z dnia 14.03.2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki. Bez wątplenia mgr inż. W. Węglewski wykazał się zaawansowaną wiedzą z mechaniki stosowanej w sprzężeniu z opisem procesu chemicznego, talentem do pracy naukowej i umiejętnościami informatycznymi. W związku z tym wnioskuję o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.