

mgr inż. Sławomir Dudziak

Instytut Techniki Budowlanej

Nieliniowa analiza żelbetowych konstrukcji powłokowych metodą elementów skończonych uwzględniająca usztywnienie zbrojenia przy rozciąganiu

Promotor

dr hab. inż. Paweł M. Lewiński, prof. ITB

Słowa kluczowe

metoda elementów skończonych, modele konstytutywne betonu, modelowanie powłokowych konstrukcji żelbetowych, usztywnienie stref rozciąganych, Abaqus

Streszczenie

W rozprawie zaproponowano strategię nieliniowej analizy dużych powłokowych konstrukcji żelbetowych metodą elementów skończonych, na którą składają się: modele konstytutywne betonu i stali zbrojeniowej, dobór odpowiednich elementów skończonych oraz metody rozwiązania problemu nieliniowego i jej parametrów. Celem pracy było stworzenie modeli konstytutywnych betonu i stali zbrojeniowej, które umożliwiają analizę dużych ustrojów powłokowych z wykorzystaniem komputerów klasy PC w możliwie krótkim czasie, tak aby były użyteczne w inżynierskiej działalności projektowej lub eksperckiej.

W pierwszej części pracy dokonano przeglądu fenomenologicznych modeli konstytutywnych betonu stosowanych w analizie konstrukcji żelbetowych. Podano przykłady modeli występujących w zaawansowanych systemach metody elementów skończonych oraz dokonano ich oceny pod kątem możliwości zastosowania w nieliniowej analizie dużych konstrukcji żelbetowych. Opisano również zjawisko usztywnienia stref rozciąganych (ang. *tension stiffening effect*) oraz sposoby jego uwzględniania w nieliniowych analizach metodą elementów skończonych. Stwierdzono, że w analizach konstrukcji żelbetowych najczęściej stosowane są sprężysto-plastyczne modele konstytutywne z izotropowym wzmocnieniem/osłabieniem. Przy rozciąganiu zachowanie betonu modelowane jest jako quasi-kruche, a "krzywej opadającej" nadaje się interpretację fizyczną *tension stiffening*.

W dalszej części pracy zaproponowano własny trójwymiarowy model konstytutywny betonu oraz uogólniony model konstytutywny stali zbrojeniowej. W zakresie rozciągania zachowanie betonu modelowane było jako kruche, wykorzystano podejście funkcjonujące w literaturze pod nazwą rys rozmazanych, ustalonych, nieortogonalnych z możliwością otwarcia do trzech rys w punkcie Gaussa. Jako powierzchnię graniczną betonu przyjęto kryterium *PJ* opracowane przez Podgórskiego. W zakresie ściskania zastosowano hiposprężyste związki konstytutywne nieliniowej sprężystości uzupełnione o warunki odciążenia. Styczne moduły odkształcenia zostały powiązane z postaciowym odkształceniem oktaedrycznym. Model konstytutywny stali został uogólniony o zjawisko *tension stiffening*. Zastosowano podejście zgodne z *ModelCode2010* oparte na równaniu równowagi pręta

rozciąganego otulonego betonem. Opracowane modele konstytutywne zostały zaimplementowane w komercyjnym systemie Abaqus poprzez procedury użytkownika UMAT. Do opracowanych modeli konstytutywnych dobrano odpowiednie elementy skończone (w odniesieniu do betonu - element objętościowy C3D8, a do prętów zbrojeniowych - element kratowy T3D2) oraz procedurę rozwiązania problemu nieliniowego wraz z jej parametrami (metodę quasi-Newtona w odmianie BFGS).

Kolejną część pracy stanowi prezentacja wyników testów opracowanych algorytmów. Pierwsze testy przeprowadzone zostały z wykorzystaniem modeli składających się z jednego elementu skończonego, w którym wymuszano jednorodny stan naprężenia lub odkształcenia. Przeprowadzono również test Willama służący do oceny modeli rys rozmazanych przy obracających się kierunkach odkształceń głównych - wynik tego testu był pozytywny. Kolejnym zadaniem była symulacja belki żelbetowej, która ulega zniszczeniu na skutek zginania. Uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników symulacji z wynikami eksperymentu. Przeanalizowano wpływ doboru siatki elementów skończonych oraz wartości parametru naprężenia rezydualnego na odpowiedź modelu i stwierdzono, że są one niewielkie. Następnie przeprowadzono symulację zachowania tarczy WT3 zbadanej przez Leonhardta i Walthera. Wyniki uzyskane z wykorzystaniem własnych procedur porównano z wynikami uzyskanymi przy zastosowaniu standardowo dostępnego w systemie Abaqus modelu sprężysto-plastyczno-kruchego *Smearred Cracking*. Stwierdzono, że w przypadku tego modelu stabilność procesu przyrostowego determinowana jest przez parametry krzywej opadającej, co uniemożliwia przyjęcie ich w oparciu o wytyczne normowe (np. powiązanie ich z efektywnym stopniem zbrojenia). Kolejny przykład dotyczył płyty DA1 zbadanej przez Absi i Brandta. Uzyskano dobrą zgodność między wynikami symulacji i badań empirycznych. W danym przykładzie porównano odpowiedź modelu przy przyjęciu: własnych procedur materiałowych oraz standardowo dostępnego sprężysto-plastycznego modelu z uszkodzeniem *Concrete Damage Plasticity*. Model *Concrete Damage Plasticity* dał niepoprawną odpowiedź, ponadto przeprowadzona analiza parametryczna ukazała istotny wpływ na rozwiązanie parametrów, które nie mają interpretacji fizycznej lub są trudne do kalibracji z wykorzystaniem standardowych badań materiałowych. Ostatnim zadaniem była analiza współpracy z podłożem cylindrycznego zbiornika żelbetowego. Porównano wyniki analizy przeprowadzonej według proponowanej strategii z wynikami wcześniejszych analiz (bazujących na modelach wykorzystujących ośiową symetrię zadania), stwierdzono dobrą zgodność wyników uzyskanych z różnych modeli. Wykorzystując opracowane modele przeprowadzono analizę wpływu zjawiska *tension stiffening* na rozkład sił wewnętrznych w powłoce oraz jej stan przemieszczenia i zarysowania.

W ostatnim rozdziale pracy, podsumowano wyniki przeprowadzonych analiz oraz nakreślono możliwe kierunki dalszych prac. W ogólności stwierdzono, że opracowane algorytmy pozwalają na dobre odwzorowanie zachowania konstrukcji żelbetowych przy niskim koszcie numerycznym. Ponadto, uwzględnienie zjawiska *tension stiffening* poprzez związek konstytutywny stali zbrojeniowej w przeciwieństwie do alternatywnego podejścia ("krzywa opadająca" w związku konstytutywnym betonu) daje relatywnie stabilną odpowiedź modelu zgodną z ogólną wiedzą z teorii konstrukcji żelbetowych i przedmiotowymi normami, a parametry modelu *tension stiffening* nie mają wpływu na nośność przewidywaną przez model konstrukcji.

S. Dudziak