

mgr inż. Wojciech Szymkuć

Analysis of behaviour and residual capacity  
of fire-exposed concrete-filled tubular columns

Abstract

In this dissertation, the structural fire behaviour of concrete-filled steel tubular (CFST) columns is studied. The research focuses on circular CFST columns, and various aspects of their structural fire behaviour were studied. The study includes a historical background and its connection to the current state-of-the-art. The available experimental data were analysed thoroughly, which helped to identify areas that need improvement in the future.

A fully parametrized, nonlinear, three-dimensional finite element model was formulated in Abaqus. The parametrization helped to build a validation domain consisting of 50 unique full-scale columns tested in fire resistance furnaces in the past. The numerical model simulated the structural behaviour of CFST columns during standard fire exposure. The fire resistance time obtained in the test and the model predictions were in good agreement.

A detailed analysis of the state-of-the-art identified research gaps and highlighted possible areas of future improvement regarding the recording of test conditions. With the validated model, it was possible to identify several factors influencing the fire resistance of CFST columns.

The validated numerical model was then further developed to account for the non-reversibility of material properties during cooling. Concrete does not regain its strength upon cooling, and this characteristic was implemented in the form of user subroutines. A reasonable fire scenario with several design fires was investigated in Fire Dynamics Simulator. The investigation provided a realistic fire scenario, including heating, decay, and cooling stages. This allowed for studies on the burnout resistance of CFST columns, showing their fire performance and Residual Load-Bearing Capacity (RLBC) is influenced by both the design fire, and initial load.

Finally, the study explored the possibilities of improving the structural fire performance of CFST columns by filling them with a material that is less prone to the adverse effects of high temperature. To that end, a literature study was conducted, and several stages of experimental research were carried out. Several lightweight cementitious composites with cenospheres (LCCC) were developed and tested. The LCCC exhibited remarkable strength properties after exposure to temperatures up to 1200°C.

Then, a numerical feasibility study was performed. The available information from the tests on LCCC were implemented into numerical models to explore, how the new filling might influence the fire resistance time of LCCC-filled steel tubular columns. In conclusion, the test results on the material, supported by a numerical modelling of LCCC-filled steel tubular columns, showed that it is feasible to attain higher fire resistance, though there are areas worth improving in the future.

# Analiza zachowania i nośność resztkowa zespolonych słupów z rur wypełnionych betonem poddanych działaniu ognia

## Streszczenie

W niniejszej rozprawie doktorskiej badane jest zachowanie słupów z rur stalowych wypełnionych betonem (CFST) w warunkach pożaru. Badania koncentrują się na okrągłych słupach CFST i różnych aspektach ich zachowania podczas pożaru. Badania obejmują tło historyczne i jego związek z aktualnym stanem wiedzy. Dostępne dane eksperymentalne zostały dokładnie przeanalizowane, co pomogło zidentyfikować obszary wymagające poprawy.

W pełni sparametryzowany, nieliniowy, trójwymiarowy model wykorzystujący metodę elementów skończonych został sformułowany w programie Abaqus. Parametryzacja pomogła zbudować domenę walidacyjną składającą się z 50 unikalnych pełnowymiarowych słupów testowanych w przeszłości w piecach ogniowych. Model numeryczny symulował zachowanie słupów CFST podczas oddziaływanie zgodnego ze standardową krzywą temperatura-czas. Czas odporności ogniowej uzyskany w badaniach i przewidywania modelu były zgodne.

Szczegółowa analiza aktualnego stanu wiedzy pozwoliła zidentyfikować luki badawcze i wskazała możliwe obszary przyszłej poprawy w zakresie rejestrowania warunków testowych. Model, po przeprowadzeniu procesu walidacji, umożliwił zidentyfikowanie czynników wpływających na odporność ogniową słupów CFST.

Model numeryczny został następnie rozwinięty w celu uwzględnienia nieodwracalności właściwości materiału podczas chłodzenia. Beton nie odzyskuje wytrzymałości po schłodzeniu, a cecha ta została zaimplementowana w postaci subrutyn użytkownika.

Program Fire Dynamics Simulator został wykorzystany do modelowania realistycznych scenariuszy pożaru z kilkoma pożarami projektowymi. Takie podejście zapewniło realistyczne oddziaływania termiczne, w tym fazy rozwoju, zaniku i chłodzenia. Pozwoliło to na zbadanie trwałości pożarowej (burnout) słupów CFST, pokazując, że na ich właściwości pożarowe i nośność resztkową (RLBC) ma wpływ zarówno pożar projektowy, jak i obciążenie początkowe.

Zbadano również możliwości poprawy odporności ogniowej słupów CFST poprzez wypełnienie ich materiałem, który jest mniej podatny na niekorzystne oddziaływanie wysokiej temperatury. W tym celu przeprowadzono badania literaturowe i kilka etapów badań eksperymentalnych. Opracowano i przetestowano kilka lekkich kompozytów cementowych z cenosferą (LCCC). Opracowanie kompozyty wykazały wyróżniające się właściwości wytrzymałościowe po oddziaływaniu temperatury do 1200 °C.

Następnie przeprowadzono numeryczne studium wykonalności. Dostępne informacje z badań własnych zostały zaimplementowane do modeli numerycznych w celu zbadania, w jaki sposób nowe wypełnienie może wpłynąć na czas odporności ogniowej stalowych słupów z rur wypełnionych LCCC. Podsumowując, wyniki badań materiałowych, poparte modelowaniem numerycznym stalowych słupów z rur wypełnionych LCCC, wykazały, że możliwe jest osiągnięcie wyższej odporności ogniowej, choć istnieją obszary warte poprawy w przyszłości.