

**Modeling of Strain-Hardening Cement-based Composites (SHCC):
A Finite Element Method using the Strong Discontinuity Approach
(SDA) with Explicit Representation of Fibers**

Modellierung von zementgebundenen Kompositmaterialien mit Verfestigung
(SHCC): Eine Finite-Elemente-Methode mit Diskontinuitäten („Strong
Discontinuity Approach“ SDA) und expliziter Darstellung von Fasern

Dissertation

**vorgelegt an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung der Würde eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -**

von

Alaleh Shehni
aus Ahvaz (Iran)

Gutachter

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häussler-Combe

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marco di Prisco

Dr.-Ing. Christina Scheffler

Dresden 2020

Abstract

Concrete is a predominant construction material due to several advantages; however, the pure cementitious composites have shown quasi-brittle behavior with undesirable typical large cracks under tensile loading conditions. Thus, the addition of a small volume of short fibers is a well-known strategy to increase the ductility and toughness of cementitious matrices besides optimization of the crack opening. Strain-hardening cement-based composites (SHCCs) is a particular class of fiber-reinforced concretes (FRCC) that can develop controlled multiple cracks while subjected to incremental tensile loading conditions. However, a proper composition design, especially concerning fiber and bond properties, still follows a trial and error approach.

This work presents a newly developed model to simulate SHCC at the meso-scale level. This model is based on Finite-Element-Method and allows for nonlinear behavior for cement matrix, fiber material, and bond laws. Concerning three complexities of target FRCC, i.e., crack formation in the cement matrix, a large number of explicit fibers with arbitrary random distribution, and fibers' interaction with the cement matrix via the bond, extra features are added to standard FE consist of:

- Further development of the Strong Discontinuity Approach (SDA) to model discrete cracking of continuum elements on the element level
- Discretization of single fibers by truss elements with truss nodes independently placed of continuum nodes
- Connecting SDA elements to explicit truss elements by particular bond elements.

In this research study, first, theoretical basics and special implementation issues were described. Later, this newly developed model was calibrated with several simple configurations. The bond law utilized in the simulation was derived from single fiber pullout test and calibrated with several analyses. In the next step, 2D SHCC dumbbell specimens under tensile loading condition were simulated, and a series of numerical case studies were performed to assess the quality, credibility, and limitations of the numerical model. It should be noted

that cracking patterns could not be directly compared to experimental cracking patterns as the simulation model's current state is deterministic by random material properties that influence the experimental specimen behavior. Taking the effect of random field and other simplifying assumptions into account, the simulation model seems to describe enumerated SHCC behavior at an acceptable level.

In summary, a further base is given for the target-oriented design of FRCC material composition to reach the given objectives of material properties. The concepts and methods presented in this study can simulate short and thin polymer fibers in a random position and steel fibers and structures with long reinforcement in a regular arrangement.

Kurzfassung

Beton ist aufgrund mehrerer Vorteile ein vorherrschender Baustoff. Die reinen zementhaltigen Verbundwerkstoffe zeigten jedoch ein quasi sprödes Verhalten mit unerwünschten typischen großen Rissen unter Zugbelastungsbedingungen. Daher ist, neben der Optimierung der Rissöffnung, die Zugabe eines kleinen Volumens von kurzen Fasern eine bekannte Strategie, um die Duktilität und Zähigkeit von zementhaltigen Matrizen zu erhöhen. Verbundwerkstoffe auf Zementbasis mit Verfestigungseigenschaften (SHCCs) sind eine besondere Klasse von faserverstärkten Betonen (FRCC), die unter inkrementellen Zugbelastungsbedingungen kontrollierte Mehrfachrisse entwickeln können. Ein geeignetes Zusammensetzungsdesign, insbesondere in Bezug auf Faser- und Verbundeigenschaften, folgt jedoch immer noch der Versuch-und-Irrtum-Methode.

Diese Arbeit präsentiert ein neu entwickeltes Modell zur Simulation von SHCC auf mesoskaliger Ebene. Dieses Modell basiert auf der Finite-Elemente-Methode und ermöglicht nicht-lineares Verhalten für Zementmatrix-, Fasermaterial- und Verbundgesetze. In Bezug auf drei Komplexitäten des Ziel-FRCC, d.h. die Rissbildung in der Zementmatrix, eine große Anzahl expliziter Fasern mit zufälliger Verteilung und die Wechselwirkung der Fasern mit der Zementmatrix über den Verbund, werden der Standard-Finite-Elemente-Methode zusätzliche Merkmale hinzugefügt:

- Weiterentwicklung des Strong Discontinuity Approach (SDA) zur Modellierung der diskreten Rissbildung von Kontinuumselementen auf Elementebene
- Diskretisierung einzelner Fasern durch Stabelemente mit Knoten, die unabhängig von Kontinuums-knoten angeordnet sind
- Verbinden von SDA-Elementen mit beliebig angeordneten Stabelementen durch neu entwickelte Verbundelemente

In dieser Forschungsstudie wurden zunächst theoretische Grundlagen und spezielle Implementierungsprobleme beschrieben. Später wurde dieses neu entwickelte Modell mit mehreren einfachen Konfigurationen kalibriert. Das in der Simulation verwendete Verbundgesetz wurde

aus einem Einzelfaser-Ausziehtest abgeleitet und mit mehreren Analysen kalibriert. Im nächsten Schritt wurden 2D-SHCC-Hantelproben unter Zugbelastungsbedingungen simuliert und eine Reihe numerischer Fallstudien durchgeführt, um die Qualität, die Anwendungsmöglichkeiten und Einschränkungen des numerischen Modells zu bewerten. Es ist zu beachten, dass Rissmuster nicht direkt mit experimentellen Rissmustern verglichen werden konnten, da der aktuelle Zustand des Simulationsmodells durch zufällige Materialeigenschaften bestimmt wird, die das Verhalten der experimentellen Probe beeinflussen. Unter Berücksichtigung des Effekts des Zufallsfelds und anderer vereinfachender Annahmen scheint das Simulationsmodell das aufgezählte SHCC-Verhalten auf einem akzeptablen Niveau zu beschreiben.

Zusammenfassend wird eine weitere Grundlage für das zielgerichtete Design der FRCC-Materialzusammensetzung angegeben, um die vorgegebenen Ziele der Materialeigenschaften zu erreichen. Die in dieser Studie vorgestellten Konzepte und Methoden können kurze und dünne Polymerfasern in zufälliger Position und Stahlfasern und -strukturen mit langer Verstärkung in regelmäßiger Anordnung simulieren.