

**INFLUENCE OF FIBER TYPE AND MATRIX COMPOSITION ON THE
TENSILE BEHAVIOR OF STRAIN-HARDENING CEMENT-BASED
COMPOSITES (SHCC) UNDER IMPACT LOADING**

**ZUM EINFLUSS DER FASERART UND
MATRIXZUSAMMENSETZUNG AUF DAS ZUGVERHALTEN VON
HOCHDUKTILEM BETON BEI IMPAKT-BEANSPRUCHUNG**

An der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung der Würde eines Doktors-Ingenieurs (Dr.-Ing.) eingereichte

DISSERTATION

vorgelegt von
Iurie Curoșu, M.Sc.
aus Chișinău (Moldawien)

eingereicht am 06. Juni 2017

Tag der mündlichen Prüfung: 20 Juli 2017

Gutachter:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe
Assist. Prof. Ravi Ranade (University at Buffalo, USA)

ABSTRACT

Strain-hardening cement-based composites (SHCC) are a special class of fiber-reinforced concrete which develop multiple, fine cracks when subjected to increasing tensile loading, reaching strain capacities of up to several percent. The tensile behavior of SHCC is a result of a purposeful material design accounting for the mechanical and physical properties of the cementitious matrix, of the reinforcing fibers and of their interaction.

The exceptionally high energy dissipation through inelastic deformations before reaching tensile strength makes SHCC suitable for manufacturing or strengthening of structural elements which may be subjected to impact loading. However, the tensile behavior of SHCC is highly strain rate dependent, both in terms of tensile strength and strain capacity. The different strain rate sensitivities of the constitutive phases of SHCC (matrix, fiber and interfacial bond) lead to disproportionate dynamic alteration of their mechanical properties under increasing strain rates and, consequently, to an impairment of the micromechanical balance necessary for strain-hardening and multiple cracking. Thus, high energy dissipation under impact loading can only be ensured through a targeted material design.

This work presents a series of mechanical experiments at different strain rates and different scales of investigation with the goal of developing a qualitative and quantitative basis for formulating material design recommendations for impact resistant SHCC. Three different types of SHCC were investigated, consisting of two types of polymer fibers (polyvinyl-alcohol and high-density polyethylene) and cementitious matrices (normal-strength and high-strength).

Uniaxial tension experiments were performed on SHCC specimens and on non-reinforced matrix specimens with different testing setups at strain rates ranging from 10^{-4} to 150 s^{-1} . Besides the measured mechanical properties, special attention was paid to the crack patterns and the condition of fracture surfaces. Additionally, micro-scale investigations were performed to quantify the strain rate dependent changes in the mechanical behavior of individual component phases, i.e., matrix, fibers and fiber-matrix bond.

The results obtained from the micromechanical investigations were used in an analytical model for crack bridging. The model links the micromechanical parameters and their strain rate sensitivities to the single-crack opening behavior under increasing displacement rates, making it useful for material design purposes. If given an extensive experimental basis for the

fracture mechanical properties of the non-reinforced cementitious matrices, the model can be extended for predicting the strain capacity (multiple cracking) of SHCC under different strain rates.

ZUSAMMENFASSUNG

Die hochduktilen Betone (Engl.: Strain-Hardening Cement-based Composites – SHCC) bilden eine besondere Klasse von Faserbetonen, die eine multiple Rissbildung unter zunehmenden Zugspannungen aufweisen, was zu einer sehr hohen Bruchdehnung führt. Das dehnungsverfestigende, hochduktiler Zugverhalten der SHCC wird durch eine gezielte Materialentwicklung erreicht, die die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der zementgebundenen Matrizen, der Kurzfasern und deren Zusammenwirkung berücksichtigt.

Das außergewöhnliche Energieabsorptionsvermögen der SHCC durch plastische Verformungen vor dem Erreichen der Zugfestigkeit qualifiziert diese Verbundwerkstoffe für die Herstellung oder Verstärkung von Bauteilen, die Impakt-Beanspruchungen ausgesetzt sein könnten. Jedoch weisen SHCC sowohl bezüglich deren Zugfestigkeit als auch deren Dehnungskapazität ein ausgeprägtes dehnratenabhängiges Verhalten auf. Unter zunehmenden Dehnraten führen die unterschiedlichen Dehnratensensitivitäten der gestaltenden Phasen von SHCC (Matrix, Faser und deren Verbund) zur Beeinträchtigung des mikromechanischen Gleichgewichts, welches für die Dehnungsverfestigung und multiple Rissbildung erforderlich ist. Eine hohe Energiedissipation unter Impakt-Beanspruchungen kann deshalb nur durch eine gezielte Materialentwicklung der SHCC hinsichtlich deren Verhaltens unter hohen Dehnraten gewährleistet werden.

Die vorliegende Arbeit umfasst eine Reihe von experimentellen Untersuchungen mit verschiedenen Dehnraten und an unterschiedlichen Betrachtungsebenen, mit dem Ziel eine qualitative und quantitative Basis für Empfehlungen zur Materialentwicklung von Impakt-resistenten SHCC zu schaffen. Drei verschiedene SHCC-Zusammensetzungen wurden untersucht. Die Referenz-Zusammensetzung aus einer normalfesten zementgebundenen Matrix und Polyvinyl-Alkohol-Kurzfasern wurde mit zwei unterschiedlichen SHCC verglichen (hochfest und normalfest), die mit Kurzfasern aus hochdichtem Polyethylen bewehrt wurden.

Einaxiale Zugversuche wurden an SHCC-Proben und unbewehrten Matrix-Proben mit verschiedenen Prüfvorrichtungen bei Dehnraten von 10^{-4} bis 150 s^{-1} durchgeführt. Zusätzlich zu den gemessenen mechanischen Eigenschaften wurden die Rissbildung und die Bruchflächen detailliert untersucht. Darüber hinaus wurden mikromechanische Untersuchungen durchgeführt, um die Dehnratensensitivität der einzelnen Phasen, d.h. Matrix, Faser und deren Verbund zu beschreiben.

Die aus den mikromechanischen Untersuchungen erzielten Ergebnisse wurden als Eingangswerte in einem analytischen Einzelriss-Modell verwendet. Das entwickelte Modell verbindet die mikromechanischen Parameter und deren Dehnratenabhängigkeit mit dem Rissöffnungsverhalten von SHCC bei zunehmenden Verschiebungsraten. Das macht es vorteilhaft für Materialentwicklungszwecke. Das Modell kann für die Vorhersage der Dehnungskapazität von SHCC bei diversen Dehnraten weiterentwickelt werden, wenn eine umfassende experimentelle Basis für die bruchmechanischen Eigenschaften der Matrizen vorliegt.