

Tensile behavior of high-performance cement-based composites with
hybrid reinforcement subjected to quasi-static and impact loading

Zugverhalten von zementgebundenen
Hochleistungsverbundwerkstoffen mit hybrider Bewehrung unter
quasi-statischer und Impaktbeanspruchungen

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

DISSERTATION

vorgelegt von

Ting Gong, M.Sc.

aus China

eingereicht am 13. July 2020

Tag der mündlichen Prüfung: 14. September 2020

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine

Young Investigator Dr.-Ing. Christina Scheffler

Prof. Dr. Christopher Kin Ying Leung

(The Hong Kong University of Science and Technology, HK, China)

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine

Institut für Baustoffe

Fakultät Bauingenieurwesen

Technische Universität Dresden

01062 Dresden

Telefon: +49 351 463 36311

Telefax: +49 351 463 37268

Email: i.baustoffe@tu-dresden.de

Alle Rechte, auch des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, sind vorbehalten.

Druck: Druckerei & Verlag Fabian Hille, Boderitzer Straße 21e, 01217 Dresden

ISBN 978-3-86780-663-3

ABSTRACT

Strain-hardening cement-based composites (SHCC) and textile-reinforced concrete (TRC) are two novel types of fiber-reinforced cementitious composites that exhibit ductile, strain-hardening tensile behavior. SHCC comprises fine-grained cementitious matrices and short, high-performance polymer fiber, while TRC is a combination of a fine-grained, cementitious matrix and continuous two- or three- dimensional textile layers of multi-filament yarns, usually made of carbon or alkali-resistant glass. Both composites yield high inelastic deformations in a strain-hardening phase due to the successive formation of multiple fine cracks. Such cracking behavior stands for high energy absorption of the composites when exposed to extreme loading, without abrupt loss of load-bearing capacity.

In comparative terms, SHCC shows superior strain capacity, while TRC yields considerably higher tensile strength. The addition of short fibers strengthens the matrix by efficiently restraining the micro-cracks' growth and reducing spallation, while the textile reinforcement ensures a secure confinement of the reinforced concrete element (substrate to be strengthened), as well as a favorable stress distribution. The combination of SHCC and textile reinforcement is expected to deliver high tensile strength and stiffness in the strain-hardening stage along with pronounced multiple cracking. In order to achieve a favorable synergetic effect, a purposeful material design is required based on a clear understanding of the mechanical interactions in the composites.

In the framework of the DFG Research Training Group GRK 2250, which aims at enhancing structural impact safety through thin strengthening layers made of high-performance mineral-based composites, this work focuses on developing hybrid fiber-reinforced cementitious materials to be applied on the impact rear side. The development concept builds upon a systematic investigation of various aspects of the mechanical behaviors of SHCC and textile at quasi-static and impact strain rates, including the bond properties of fiber to matrix and textile to matrix. Accordingly, uniaxial quasi-static tension tests were first performed on SHCC, bare textile, and hybrid-reinforced composite specimens. The parameters under investigation were types of short fiber and textile reinforcements, reinforcing the ratio for textile as well as bond properties between textile and the surrounding SHCC. Furthermore, impact tension tests were performed to study the strain rate effect on the synergetic composite response. Finally, single-yarn pull-out tests were carried out under both quasi-static and impact loading rates to supplement the comparative assessment of the hybrid fiber-reinforced composites. These tests yielded shear strength-related parameters for quantifying the bond properties of different materials, which were then used as input of the analytical model developed to describe the

mechanics of crack propagation and tension stiffening effect of textile-reinforced composites without short fibers. This model is the first step towards a comprehensive analytical description of the tensile behavior of hybrid fiber-reinforced composites based on the experimental data and input parameters attained through the work at hand.

ZUSAMMENFASSUNG

Hochduktile Betone (Engl.: Strain-Hardening Cement-based Composites – SHCC) und Textilbetone (engl.: Textile Reinforced Concrete – TRC) sind zwei neuartige Faserbetone, die ein duktiler und dehnungsverfestigendes Zugverhalten aufweisen. SHCC bestehen aus feinkörnigen Zementmatrizen und kurzen Hochleistungspolymerfasern, während TRC eine Kombination aus feinkörnigen Zementmatrizen und kontinuierlichen zwei- oder dreidimensionalen Textilschichten darstellt. Letztere bestehen aus Multifilamentgarnen aus Kohlenstoff, alkalibeständigem Glas oder Polymerfasern. Die hohe elastische Verformbarkeit beider Verbundwerkstoffe bis zum Erreichen der Zugfestigkeit entsteht aus der sukzessiven Bildung multipler feiner Risse. Neben der hervorragenden Risskontrolle und Duktilität weisen diese Verbundwerkstoffe ein hohes Energieabsorptionsvermögen auf, was in Bezug auf kurzzeitdynamische Belastungen eine durchaus erstrebenswerte Eigenschaft darstellt.

Obwohl SHCC eine höhere Dehnungskapazität als herkömmliche TRC zeigen, weisen die Textilbetone eine erheblich höhere Zugfestigkeit auf. Darüber hinaus besitzen die textilbewehrten Betone deutlich niedrigere Einflüsse von Anwendungstechnologie und Maßstab auf das Zugverhalten, d. h. eine bessere Robustheit. Daher stellt die Kombination dieser beiden Bewehrungskonzepte einen vielversprechenden Ansatz dar. Während die Kurzfasern für eine bessere Risskontrolle und Erstrissfestigkeit sorgen, sichern die Textilgelege eine hohe Zugfestigkeit sowie Steifigkeit im gerissenen Zustand und eine gleichmäßige Verteilung der Kräfte in der Verstärkungsschicht bzw. im Bauteil. Dieser synergetische Effekt kann jedoch nur durch eine zielgerichtete Materialentwicklung erreicht werden, die eine grundlegende Materialcharakterisierung unter verschiedenen Belastungsszenarien erfordert.

Im Rahmen des DFG-finanzierten Graduiertenkollegs GRK 2250 „Impaktsicherheit von Baukonstruktionen durch mineralisch gebundene Komposite“ werden duktile und Impakt resistente Komposite entwickelt, charakterisiert und erprobt, die als dünne Verstärkungsschichten auf bestehende Konstruktionen bzw. Bauelemente aufgetragen werden und dadurch deren Widerstandsfähigkeit und Resilienz gegen extreme kurzzeitdynamische Beanspruchungen signifikant erhöhen. Die in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des A3-Projektes innerhalb des GRK 2250/1 erzielt. Ziel dieser Arbeit war es, die grundlegenden mechanischen Eigenschaften und die Dehnratenabhängigkeit von mineralisch gebundenen Kompositen mit hybrider Faserbewehrung zu erfassen und zu beschreiben. Das Forschungskonzept besteht aus systematischen und parametrischen Untersuchungen der einzelnen Komponenten (Faser, Textil, zementgebundene Matrix), ihres

Verbundes und der entsprechenden Verbundwerkstoffe. Hierfür wurden zweckbestimmte Prüfkfigurationen und dreidimensionale Messverfahren angewandt, die in anderen Projekten des GRK 2250/1 entwickelt wurden. Außer uniaxialen, quasistatischen und dynamischen Zugversuchen wurden quasistatische und dynamische Einzelgarnauszugsversuche durchgeführt. Die wichtigsten untersuchten Materialparameter waren die Art der Kurzfaserbewehrung und der Textilien (Material, geometrische und Oberflächeneigenschaften, Art der Tränkung usw.).

Auf Basis der mechanischen Experimente wurde ein analytisches Modell eingesetzt und angepasst, dass das Zugverhalten solcher Komposite in Abhängigkeit von verschiedenen Materialparametern abbilden soll.

Zusätzlich zu der detaillierten Beschreibung der Materialeigenschaften, der maßgebenden Mechanismen und synergetischen Effekte bilden die erzielten Ergebnisse eine umfangreiche experimentelle Basis für eine empirische und Modell gestützte Weiterentwicklung und Optimierung dieser Verbundwerkstoffe mit Hinblick auf wirtschaftliche und ökonomische Aspekte.