

Mechanical characterization of strain-hardening cement-based composites under impact loading

Mechanische Charakterisierung von dehnungsverfestigenden
zement-basierten Verbundwerkstoffen unter Impaktbeanspruchung

An der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden zur
Erlangung der Würde eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

eingereichte

DISSERTATION

Vorgelegt von

Ali ASSADZADEH HERAVI, M. Sc.

aus Mashhad (Iran)

eingereicht am 05. Juni 2020

Tag der mündlichen Prüfung: 05. August 2020

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Viktor MECHTCHERINE

Prof. Dr.-Ing. Joško OŽBOLT (University of Stuttgart)

Prof. Dr. Barzin MOBASHER (Arizona State University)

Abstract

Strain hardening cement-based composites (SHCC) and textile reinforced concrete (TRC) are two types of novel cementitious materials which can be used for strengthening structural elements against impact loading. Under tensile loading, these composites exhibit a strain hardening behavior, accompanied with formation of multiple cracks. The multiple cracking and strain hardening behavior yield a high strain and energy absorption capacity, thus making SHCC and TRC suitable materials for impact resistant structures or protective layers.

The design and optimization of such composites for impact resistant applications require a comprehensive characterization of their behavior under various impact loadings. Specifically, the rate dependent behavior of the composites and their constituents, i.e. matrix, reinforcement, and their bond, need to be described.

In the context of dynamic testing, SHCC, TRC and their constituents require customized experimental setups. The geometry of the sample, ductility of the material, the need for adapters and their influence on the measurements, as well as the influence of inertia are the key aspects which should be considered in developing the impact testing setups.

The thesis at hand deals with the development process of various impact testing setups for both composite scale and constituent scale. The crucial aspects to be taken into account are discussed extensively. As a result, a gravity driven split-Hopkinson tension bar was developed. The setup was used for performing impact tension experiments on SHCC, TRC and yarn-matrix bond. Moreover, its applicability for performing impact shear experiments was examined. Additionally, a mini split-Hopkinson tension bar for high speed micromechanical experiments was designed and built. In the case of compressive loading, the performance of SHCC was investigated in a split-Hopkinson pressure bar.

The obtained results, with focus on tensile experiments, were evaluated concerning their accuracy, and susceptibility to inertia effects. Full-field displacement measurement obtained by digital image correlation (DIC) was used in all impact experiments as a tool for visualizing and explaining the fracture process of the material in conjunction with the standard wave analysis performed in the split-Hopkinson bars. Moreover, the rate dependent behaviors of the composites were clarified with respect to the rate dependent behavior of their constituents.

Kurzfassung

Hochduktiler Beton mit Kurzfaserbewehrung (SHCC) und Textilbeton (TRC) sind zwei Arten von neuartigen Faserbetonen, die zur Verstärkung von Bauteilen bei Stoßbelastung verwendet werden können. Unter der Zugbelastung zeigen diese Verbundwerkstoffe ein Verfestigungsverhalten, das mit zahlreichen Rissbildungen einhergeht. Die multiple Rissbildung und das Verfestigungsverhalten führen zu einem hohen Dehnungs- und Energieabsorptionsvermögen. Diese begründen die Eignung von SHCC und TRC als Material zur Herstellung von stoßbelasteten Strukturen oder Schutzschichten.

Die Entwicklung und die Optimierung solcher Verbundwerkstoffe für die Anwendung bei Stoßbelastungen erfordern eine umfassende Charakterisierung ihres Verhaltens bei solchen Beanspruchungen. Insbesondere muss das dehnratenabhängige Verhalten der Verbundstoffe und ihrer Bestandteile, d. h. der Matrix, der Bewehrung und des Verbundes zwischen beiden Komponenten, beschrieben werden.

Die Charakterisierung des mechanischen Verhaltens von SHCC und TRC einschließlich ihrer Bestandteile bei dynamischer Beanspruchung erfordert die Entwicklung und Anwendung materialspezifischer Versuchsmethoden. Die Geometrie der Probe, die Duktilität des Materials, der Bedarf an Adaptern zu Lasteinleitung und deren Einfluss auf die Messungen sowie der Einfluss der Masseträgheit sind Schlüsselaspekte, die bei der Entwicklung der Prüfaufbauten berücksichtigt werden sollten.

In der vorliegenden Arbeit wird die Entwicklung von Versuchsanordnungen zur Charakterisierung des mechanischen Verhaltens der Verbundmaterialien SHCC und TRC als auch von deren Komponenten bei stoßartiger Belastung vorgestellt. Die entscheidenden Aspekte der Entwicklungsarbeit werden ausführlich diskutiert. Ein Ergebnis ist ein Split-Hopkinson Tension Bar (SHTB), der zur Durchführung von Hochgeschwindigkeits-Zugversuchen an SHCC, TRC und Garn-Matrix-Verbunden verwendet wurde. Darüber hinaus wurde die Anwendbarkeit des Versuchsaufbaus für die Durchführung von stoßartigen Scherversuchen untersucht. Ein weiteres Ergebnis ist ein Mini-Split-Hopkinson Bar für mikromechanische Hochgeschwindigkeitsversuche. Das mechanische Leistungsvermögen von SHCC bei Druckstoßbelastung wurde in einem für Druckversuche geeigneten Split-Hopkinson Bar untersucht.

Vor allem die Ergebnisse aus den Zugversuchen wurden hinsichtlich ihrer Genauigkeit und Anfälligkeit für Masseträgheitseffekte ausgewertet. Aus der Anwendung von Digital Image Correlation (DIC) erhaltene flächenhafte Verformungsmessungen wurde in allen dynamischen Versuchen zur Visualisierung und Erklärung des

Bruchprozesses des Materials in Verbindung mit der in dem SHTB durchgeführten Wellenanalyse verwendet. Des Weiteren wurde das dehnratenabhängige Verhalten der Verbundwerkstoffe in Abhängigkeit vom Verhalten ihrer Komponenten aufgeklärt.