

**Behaviour of Strain-hardening Cement-based Composites
(SHCC) under monotonic and cyclic tensile loading**

**Verhalten von hochduktilen Kurz-faserbeton unter
monotoner und zyklischer Zugbeanspruchung**

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

Abstract and Theses / Kurzfassung und Thesen

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Petr Jůn
aus Prag

eingereicht am 04. Oktober 2010.

Gutachter:
Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine,
Prof. Petr Kabele, Ph.D.

Abstract

This thesis reports on experimental investigations and the development of a multi-scale model for Strain-hardening Cement-based Composites (SHCC) under monotonic and cyclic tensile loading. The objective of this research was the identification and description of the determining physical phenomena influencing material performance at different levels of observation. Such profound knowledge is indispensable for the envisaged safe and economical design.

SHCC is a class of materials characterised by high strain capacity and pronounced strain-hardening under tensile load. This behaviour is attributed to the progressive multiple cracking achieved by the optimized crack-bridging action of short, thin, well distributed polymeric fibres.

Based on a literature review, the state of the art is presented and critically discussed to identify key questions that are yet to be answered satisfactorily. This provides the starting point for the investigations presented in this thesis.

The experimental program included uniaxial tensile tests on dumbbell and notched prismatic specimens, single fibre pullout tests and single fibre tensile tests. Furthermore, compressive and bending tests were performed. Experiments were carried out under monotonic and cyclic deformation controlled as well as under cyclic and sustained load controlled loading regimes. In addition, optical investigations of the SHCC microstructure were performed in order to provide detailed insights into the failure mechanisms observed in the mechanical tests.

Uniaxial tensile tests on dumbbell shaped specimens provided detailed characteristics of the specific behaviour of SHCC. The results observed did not show any pronounced effect of loading conditions on material performance in terms of strain capacity and work to fracture. The analysis of the hystereses of the stress-strain curves showed a pronounced decrease in the material stiffness with an increasing number of loading cycles. The number of cracks as well as their individual widths as observed on the specimen's surfaces did not vary much among the investigated loading regimes. The number of cracks developed gradually in relation to the strain level reached.

Uniaxial tensile tests on notched prismatic specimens revealed in general higher tensile strength and more pronounced strain-hardening behaviour in comparison to the experiments on dumbbell prisms. On the other hand, the strain capacity measured on notched prisms was much lower. Despite the predetermination of failure area through notches, all specimens tested revealed multiple cracking response. Direct investigations on the behaviour of one single crack were therefore not possible.

The pullout tests showed that their results can vary significantly. Four main pullout scenarios are described in detail, and a statistical evaluation is presented. When the chemical bond was exceeded and complete fibre de-bonding occurred, the pullout process became irreversible. Furthermore, the pullout displacements were much higher than the fibre deformations. Therefore, the pullout behaviour is of high importance for the overall tensile performance of SHCC.

The behaviour of a single PVA fibre can be considered as linear elastic-plastic. Detailed characteristics of material performance were derived. It was concluded that the components of irreversible deformation cannot be neglected. Fibre creep can however be considered insignificant.

The microscopic investigations showed that the material structure cannot be considered to be homogeneous at the microscopic level of observation. The size of

the aggregate and fly ash particles used in SHCC cannot be neglected when single fibre pullout is considered.

Based on the results of the experimental investigations, constitutive relations for SHCC under monotonic and cyclic tensile loading were derived. These constitutive relationships were developed on the basis of a multi-scale modelling approach which considers the determining physical phenomena observed in experimental investigations. The model is based on reproducing the fibre pullout behaviour by a multi-linear approximation, while statistics are used in order to describe the variance of results as observed in the pullout tests.

These responses were further superimposed in order to describe the stress-crack opening behaviour of each individual crack. Fibre embedment length and the influence of fibre inclination served as main parameters.

The overall stress-strain relations for material under tensile loading were then derived by considering an increasing number of cracks in serial interconnection and the contribution of the un-cracked matrix. Particular cracking behaviour was adjusted by varying the number of bridging fibres in different cracks and by varying the matrix strengths according to the range observed in experiments.

The model was verified by comparison of the predicted tensile responses under monotonic and cyclic loading with experimental results obtained from the uniaxial tensile tests on SHCC. In general the experimental and predicted curves were found to be in good agreement. Based on the modelled tensile behaviour of bulk SHCC the different phenomena which govern material performance are subsequently discussed.

The developed model can be used as an aid in the material design of advanced fibre-reinforced cement-based materials like SHCC, but it also can provide a good basis for defining material laws suitable for design codes.

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein neu entwickeltes multiskalares Modell für hochduktilen Betone mit Kurzfaserbewehrung (Strain-hardening Cement-based Composites, SHCC) unter monotoner und zyklischer Zugbeanspruchung vorgestellt. Hierzu wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt mit dem Ziel, die für das Materialverhalten auf den verschiedenen Betrachtungsebenen maßgeblichen physikalischen Phänomene zu identifizieren und zu beschreiben. Derart grundlegendes und umfassendes Wissen ist unerlässlich für ein zukünftig für das Material zu entwickelndes sicheres und ökonomisches Bemessungskonzept.

Hochduktilen Betone zeichnen sich durch ihre hohe Bruchdehnung unter Zugbeanspruchung bei ausgeprägter Dehnungsverfestigung aus. Dieses Materialverhalten ist auf die fortschreitende Bildung multipler Risse zurückzuführen, welche durch optimiertes Rissüberbrückungsverhalten der Kurzfaserbewehrung aus Polymerfasern erreicht wird.

In einer Literatursichtung wird zunächst der Kenntnisstand zum Verhalten von SHCC unter Zugbeanspruchung dargestellt und kritisch diskutiert. Hierbei werden die noch zu erforschenden Fragen präzisiert und die Grundlagen für deren Untersuchung geschaffen.

In den darauf aufbauenden experimentellen Untersuchungen wurde das Materialverhalten unter einachsigen Zug an hantelförmigen und gekerbten prismatischen Probekörpern studiert. Das Programm umfasste monotone und zyklische verformungsgesteuerte Zugversuche sowie zyklische und Dauerlastversuche mit kraftgesteuertem Verlauf. Darüber hinaus wurden Einzelfaserauszugsversuche und Zugversuche an Einzelfasern sowie Druck- und Biegezugversuche durchgeführt. Außerdem wurde die Mikrostruktur des hochduktilen Betons optisch untersucht, um detaillierte Erkenntnisse zum beobachteten Versagensmechanismus zu gewinnen.

Die Ergebnisse der einachsigen Zugversuche an hantelförmigen Probekörpern zeigten keinen ausgeprägten Einfluss der Belastungsart auf Bruchdehnung und Arbeitsvermögen (engl.: work to fracture). Dies gilt ebenso für die Anzahl der Risse im Probekörper, welche mit zunehmender Probekörperdehnung anstieg, sowie die Breite der einzelnen Risse auf der Probekörperoberfläche. Bei zyklischer Belastung zeigten die Hysteresekurven des Spannungs-Dehnungsverlaufs jedoch einen ausgeprägten Rückgang der Materialsteifigkeit mit zunehmender Zahl der Lastzyklen.

Im Vergleich zu den hantelförmigen Probekörpern wiesen die gekerbten Probekörper unter einachsigen Zug im Allgemeinen höhere Zugfestigkeiten und eine ausgeprägtere Dehnungsverfestigung auf. Die gemessenen Bruchdehnungen waren jedoch deutlich niedriger. Trotz der durch die Kerbe vorgegebenen Versagensebene kam es ausnahmslos zu multipler Rissbildung, weshalb eine direkte Untersuchung des Verhaltens eines Einzelrisses nicht möglich war.

Die Ergebnisse der Untersuchungen des Einzelfaserauszugs streuten stark, wobei vier Versagensarten unterschieden werden konnten, welche in der vorliegenden Arbeit ausführlich erläutert sind und deren Verhalten statistisch ausgewertet wurde. Es wird dargelegt, dass irreversibler Faserauszug ab dem Moment stattfindet, ab dem die vom chemischen Verbund zwischen Faser und umgebender Matrix aufnehmbare Kraft überschritten wurde und es zu einer kompletten Ablösung der Faser von der Matrix kam. Die beobachteten Verformungen

bei Faserauszug waren deutlich größer als die Verformungen der Fasern selbst, was die große Bedeutung des Faserauszugverhaltens für das Verhalten von hochduktilen Beton unter Zugbeanspruchung verdeutlicht.

Die Untersuchungen an Einzelfasern zeigten, dass deren Materialverhalten mit einem linear elastisch-plastischen Stoffgesetz abgebildet werden kann, dessen charakteristischen Eigenschaften im Rahmen der vorliegenden Arbeit abgeleitet wurden. Des Weiteren wird gezeigt, dass Faserkriechen vernachlässigt werden kann.

Die mikroskopischen Untersuchungen zeigten, dass die Materialstruktur auf der Mikroebene nicht als homogen angenommen werden kann. Die Größe der verwendeten Zuschläge und Flugaschepartikel kann beim Einzelfaserauszug nicht vernachlässigt werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen wurden gesetzmäßige Beziehungen für SHCC unter monotoner und zyklischer Zugbelastung abgeleitet. Diese Beziehungen wurden auf Basis eines multiskalaren Modellansatzes formuliert, der die entscheidenden physikalischen Phänomene berücksichtigt, welche in den experimentellen Untersuchungen beobachtet wurden. Auf der Mikroebene basiert das Modell auf der Reproduktion des Faserauszugverhaltens mit Hilfe einer multilinearen Approximation, wobei die Streuung der Ergebnisse der Faserauszugsversuche stochastisch modelliert wird.

Verschiedene Realisierungen des Modells auf Mikroebene wurden auf der Mesoebene superponiert, um die Spannungs-Rissöffnungsbeziehung jedes einzelnen Risses zu beschreiben, wobei Faserverankerungslänge und Faserneigung die entscheidenden Einflussparameter darstellten.

Auf der Makroebene wurde die Spannungs-Dehnungsbeziehung des Materials unter Zugbelastung durch die Reihenschaltung einer zunehmenden Anzahl von Rissen sowie des Beitrags der rissfreien Matrix dargestellt. Das konkrete Rissverhalten des Materials unterscheidet sich hierbei entsprechend der experimentellen Beobachtungen in der Anzahl der rissüberbrückenden Fasern sowie der Matrixfestigkeit.

Das Modell wurde durch Vergleich des vorhergesagten Zugverhaltens unter monotoner und zyklischer Belastung mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen unter einachsiger Zugbeanspruchung verifiziert. Hierbei konnte eine gute Übereinstimmung der experimentellen und der mit dem Modell vorhergesagten Kurvenverläufe festgestellt werden. Aufbauend auf der Modellierung des Zugverhaltens des Materials auf der Makroebene wurden die maßgebenden physikalischen Phänomene identifiziert und diskutiert, welche das Materialverhalten unter Zugbeanspruchung bestimmen.

Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Modell kann wertvolle Hilfestellungen bei der Entwicklung fortgeschrittener faserbewehrter zemetgebundener Werkstoffe wie SHCC geben. Darüber hinaus ist es eine gute Basis für die Ableitung von Materialgesetzen für Bemessungsnormen.

Theses

1. Due to the absence of the autogenous shrinkage of SHCC specimens during the time of storing in moulds, no cracking due to restraint can occur. The most neutral curing method to be used is sealing in polymeric foil in order to prevent possible effect of crack formation due to the drying shrinkage.
2. There is no pronounced effect of loading conditions (monotonic and cyclic deformation controlled as well as cyclic and creep load controlled regimes) on behaviour of bulk SHCC. Gradual decrease of material stiffness can be observed with increasing number of cycles and imposed strain, respectively.
3. The number of cracks as well as their individual widths are not affected by the investigated loading regimes. The number of cracks develops gradually in relation to the strain level reached.
4. Tensile experiments on notched specimens reveal multiple cracking in all cases. Obtaining a stress-crack opening relation for just one single crack by means of notching is impossible for the investigated SHCC.
5. Pullout behaviour of single fibre is of high importance for the overall performance of bulk SHCC in the cracked state. After de-bonding, pullout process becomes irreversible. Pullout displacement is much higher than deformation of PVA fibre itself.
6. Behaviour of PVA fibre can be considered as linear elastic-plastic. The components of irreversible deformation after unloading cannot be neglected. However, performance of PVA fibre is of importance especially for interpreting the pullout results.
7. Microstructure of SHCC cannot be considered as homogenous when single fibre pullout behaviour is investigated. Pullout process is affected to a large extent by particular arrangement of coarse microstructure in fibre vicinity. Furthermore, the difference between the prescribed and actual embedded lengths of the fibre can occur due to presence of matrix imperfections (e.g. air voids).
8. Multi-scale modelling approach enables considering the determinant physical phenomena which govern SHCC behaviour at different levels of observation.
9. Distribution of fibres in the composite plays a major role with respect to the performance of each single crack. Effects of fibre inclination to the direction perpendicular to the crack plane as well as fibre double-side de-bonding and pullout cannot be neglected.
10. Properties of matrix along the specimen gauge length determine the shape of upper envelope of the overall strain-hardening response of SHCC, while stress-crack opening relations of single cracks and the number of cracks determine the strain capacity of the modelled composite. Localisation of failure occurs when the minimum matrix strength in uncracked cross-sections becomes higher than the stress carrying capacity of fibres in the weakest crack developed.
11. SHCC behaviour in monotonic and cyclic tension can be modelled by serial interconnection of gradually developing cracks and the uncracked matrix.

Thesen

1. Da autogenes Schwinden in SHCC-Probekörpern während der Lagerungszeit in Formen nicht auftritt, können keine Rissbildungen infolge Zwangsspannungen entstehen. Um mögliche Rissbildungen infolge Trockenschwindens zu verhindern, wurde die Abdichtung mit Polymerfolie als neutralste Nachbehandlungsmethode eingesetzt.
2. Es werden keine ausgeprägten Auswirkungen der Belastungsbedingungen (monotone und zyklische verformungsgesteuerte sowie zyklische und dauerlastgesteuerte Belastungsregime) auf das mechanische Verhalten von SHCC festgestellt. Eine graduelle Verringerung der Materialsteifigkeit kann mit zunehmender Zahl der Lastzyklen und der erreichten Dehnung verzeichnet werden.
3. Die Zahl der Risse sowie ihre individuellen Breiten werden nicht von den untersuchten kraftgesteuerten Belastungsregimes beeinträchtigt. Die Risszahl entwickelt sich graduell mit dem erreichten Dehnungsniveau.
4. Zugversuche an gekerbten Proben zeigen in allen Fällen mehrere Risse. Für die untersuchten SHCC ist es unmöglich, eine Spannungs-Rissöffnungsbeziehung lediglich für einen Einzelriss mit Hilfe einer Kerbung zu erhalten.
5. Das Auszugsverhalten der Einzelfaser hat eine große Bedeutung für die mechanische Gesamtleistung von SHCC im gerissenen Zustand. Nach der Ablösung der Faser von der Matrix wird der Auszugsprozess irreversibel. Die beobachteten Verformungen beim Faserauszug sind deutlich größer als die Verformungen der PVA-Faser selbst.
6. Das mechanische Verhalten der PVA-Faser kann als linear elastisch-plastisch betrachtet werden. Die Komponenten der irreversiblen Verformung der Faser nach dem Entlasten können nicht vernachlässigt werden. Für die Ergebnisinterpretation der Auszugversuche kann die Verformung der PVA-Faser nicht vernachlässigt werden.
7. Bei Betrachtung des Auszugverhaltens einer Einzelfaser muss die inhomogene Mikrostruktur von SHCC berücksichtigt werden. Der Auszugsprozess wird weitgehend durch die spezielle stoffliche Anordnung der Gefügekomponenten auf der Mikroebene in der Fasernumgebung beeinflusst. Ein Unterschied zwischen nomineller und tatsächlicher Umhüllungslänge der Faser kann aufgrund vorhandener Matrixstörstellen (z.B. Luftporen) auftreten.
8. Mit einem multiskalaren Modellansatz kann das SHCC-Verhalten unter Berücksichtigung der wesentlichen physikalischen Phänomene auf verschiedenen Betrachtungsebenen beschrieben werden.
9. In Bezug auf das Verhalten jedes Einzelrisses spielt die Faserverteilung im Material eine große Rolle. Nicht-orthogonale Faserorientierungen zur Rissebene sowie zweiseitige Faserablösungen und der anschließende Auszug können nicht vernachlässigt werden.
10. Die Gestalt der oberen Umhüllenden der modellierten Spannungs-Dehnungs-Kurve des SHCC wird durch die Verteilung der Matriceigenschaften entlang der

betrachteten Probekörperlänge bestimmt. Das hohe Dehnvermögen des modellierten Komposites wird durch die Spannungs-Rissöffnungsbeziehungen der Einzelrisse und die Anzahl der Risse festgelegt. Die Lokalisierung des Versagens an einem Riss tritt dann auf, wenn die geringste Matrixfestigkeit in den ungerissenen Querschnittsbereichen höher als die Spannungsaufnahmekapazität der Fasern in dem am schwächsten entwickelten Riss ist.

11. Das SHCC-Verhalten bei monotoner und zyklischer Zugbeanspruchung kann über die Reihenschaltung der graduell entwickelten Risse und der ungerissenen Matrix modelliert werden.