



Carbonbeton unter einaxialer Druckbeanspruchung

Carbon concrete under uniaxial compression load

Von der
Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
Zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Jakob Bochmann
Geboren am 04.09.1989 in Chemnitz

Gutachter:
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Manfred Curbach
Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich
Dr.-Ing. Frank Jesse

eingereicht am: 01. Februar 2019

verteidigt am: 07. Juni 2019

Zusammenfassung

Carbonbeton unter einaxialer Druckbeanspruchung

Die Forschung und Entwicklung von Carbonbeton in den letzten Jahren führten zu einer immer weiter fortschreitenden Einführung des innovativen und ressourcensparenden Baustoffes in die Bauwirtschaft. Um weitere Anwendungsfelder zu erschließen und vor allem Anwender von Carbonbeton überzeugen zu können, werden im nächsten Schritt allgemeingültige Normungen benötigt. Zur Entwicklung dieser Normen sind allumfassende Kenntnisse zum Material- und Tragverhalten von Carbonbeton unter verschiedensten Belastungsarten notwendig. Das Tragverhalten unter Zug-, Querkraft- und Torsionsbeanspruchung wurde in mehreren Studien bereits umfassend für Neubauteile und verstärkte Konstruktionselemente untersucht. Diese Untersuchungen zeigten bereits erste Phänomene im Zusammenhang mit unter Druck stehenden Carbonbeton, und der daraus resultierenden Abminderung der Tragfähigkeit. Diese ersten Beobachtungen legen die Notwendigkeit systematischer Studien nahe, um auch an dieser Stelle den Kenntnisstand zum Thema Carbonbeton zu vervollständigen und Auswirkungen auf das Tragverhalten darstellen zu können. Von übergeordneter Relevanz sind solche Erkenntnisse für die Druckstrebenbemessung von carbon-bewehrten Balken, welche durch Torsion oder Querkraft belastet sind; aber auch bei einer Bemessung mittels einem Stabwerkmodells von Bauteilen mit Carbon-Bewehrung spielen solche Überlegungen eine Rolle.

Die ausführliche Literaturrecherche sowie Vorversuche ergaben, dass die Carbon-Bewehrung das Betongefüge stört und somit das Tragverhalten beeinflusst. Denn im Gegenteil zu den Bewehrungsweisen im Stahlbeton können die Carbongarne keine Druckspannungen übertragen. Somit müssen die Druckspannungen um die Störstellen herum fließen, was in induzierten Querkzugspannungen resultiert, welche die Festigkeit beeinflussen.

Mit Hilfe eines optimierten Versuchsstandes konnten im Zuge der Ergründung des Tragverhaltens von Carbonbeton unter einaxialer Druckbelastung eine Vielzahl von Versuchen durchgeführt werden. Diese experimentellen Versuche, ergänzt durch numerische Berechnungen, führten zum Herausstellen der grundsätzlich wirkenden Tragmechanismen. Dabei war festzustellen, dass zwei gegensätzlich wirkende Mechanismen je nach Bewehrungsgrad und Orientierung der Bewehrung verschieden stark ausgeprägt sind. Zum einen wirkt der Störstellenmechanismus, welcher ein verfrühtes Versagen durch die induzierten Querkzugspannungen aufgrund der nötigen Umlenkungen durch die Störstellen im Beton beschreibt. Zum anderen wirkt die Querdehnungsbehinderung auf Grund des Verbundes zwischen Bewehrung und Beton dem verfrühten Versagen entgegen. Diese Mechanismen sind hauptsächlich für das anisotrope Verhalten und den charakteristischen Verlauf der Festigkeiten, bezogen auf den Winkel zwischen Bewehrung und Druckrichtung von Carbonbeton, und dessen unterschiedlichen Versagensarten verantwortlich.

Auf Grundlage der geklärten Tragmechanismen wurden die Versuchsserien miteinander verglichen, um die Auswirkungen verschiedener Einflussparameter verdeutlichen zu können. In einem ersten Vergleich konnte der Einfluss der Herstellung gezeigt werden. Dabei erzielten gegossen hergestellte Serien stets höhere Festigkeiten als Proben, welche im Handlaminierverfahren hergestellt wurden. Die Untersuchung verschiedener Garnstärken, Lagenabstände, Maschenweiten bzw. einer Kombination dieser Parameter ergab grundsätzlich, dass mit steigendem Bewehrungsgehalt die Festigkeitsreduktion und das anisotrope Verhalten zunehmen. Zusätzlich zu diesen grundsätzlichen Parametern wurden noch verschiedene

Anordnungen untersucht. Hier konnte bei versetzten Anordnungen jeder zweiten Lage oder einer verdrehten Anordnung der Textillagen um 45° kein maßgebender Einfluss festgestellt werden. Letztendlich wurden noch zwei Tränkungssysteme (weiche Styrolbutadien- und steife Epoxidharz-Tränkung) verglichen. Hier stellte sich heraus, dass die steif getränkten Textilien signifikant kleinere Festigkeitsreduktionen im Vergleich zu den weich getränkten Gelegen aufweisen. Verantwortlich für dieses Verhalten sind die Steifigkeitsunterschiede der Tränkungsarten.

Basierend auf den Versuchsergebnissen und Parametersudien konnten abschließend zwei verschiedene Modelle erarbeitet werden, welche eine Vorhersage der Festigkeitsreduktion ermöglichen. Diese beiden Modelle sollen einen Beitrag zur Findung einer allgemeinen Normung und somit zur Erweiterung des Anwendungsfeldes für Carbonbeton bieten. Das erste Modell beruht auf einem Gesteinsmodell für geklüftete Gesteine und ermöglicht eine Abschätzung der Festigkeit von einaxial belasteten Carbonbeton bei einem beliebigen Winkel zwischen Bewehrung und Belastung abhängig von der Betonfestigkeit, dem Lagenabstand und des Textilvolumens. Das zweite Modell ermöglicht es Abminderungsfaktoren für die Festigkeit von einaxial belasteten Carbonbeton zu finden. Diese Bemessungskurven ermöglichen es über den Textilvolumengehalt eine schnelle und einfache Aussage über voraussichtliche Festigkeitsreduktionen von Carbonbeton unter Druckbeanspruchung in Abhängigkeit von der Orientierung der Bewehrung zu geben.

Grundsätzlich konnte diese Arbeit das Tragverhalten von Carbonbeton unter einaxialen Druck auf experimentelle und numerische Weise in seinen Grundzügen klären und verschiedene Einflussparameter herausstellen. Damit ist ein erster Schritt zur vollständigen Klärung des Tragverhaltens von Carbonbeton unter Druckbeanspruchung in verschiedenen Bauteilen unternommen worden. Für eine direkte Übertragbarkeit der gewonnenen Ergebnisse auf reale Bauteile sind weiterführende Untersuchungen mit mehraxialen Spannungszuständen zu empfehlen. Diese Untersuchungen sollten die entwickelten Modelle bestätigen oder ergänzen.

Summary

Carbon concrete under uniaxial compression load

In the last years, the research and development of carbon concrete led to a progressive introduction of the innovative and resource-saving material into the construction sector. To develop new areas of application and to convince more users or designers of carbon concrete general standards have to be established. To develop these standards an overall knowledge about the material itself and its load bearing behavior under various load cases is necessary. The investigation of load bearing behavior under tension, shear, and torsion for new and strengthened structures has been part of different studies in the past. The results showed first phenomena regarding the behavior of carbon concrete under compression and the related reduction of compressive strength. These findings show the necessity of a systematic study of this topic to extend the state of knowledge regarding carbon concrete and to show the effects on the load bearing behavior. These findings are of great relevance for the design of compression struts in carbon-reinforced beams, which are loaded by torsion or shear. Furthermore, these kinds of considerations are relevant for the design based on a strut and tie model of carbon-reinforced elements.

A detailed literature review as well as pretests showed the disturbance of the concrete matrices caused by the carbon-reinforcement, which resulted in a different load bearing behavior. In comparison to the rebars in steel-reinforced concrete carbon-yarns cannot transfer any compression stresses. Therefore, the compression stresses have to flow around the yarns or discontinuities, by which lateral tensile stresses are introduced. Because of these tensile stresses, the compressive strength is affected.

An optimized test bed allowed a large number of experiments to explore the load bearing behavior of carbon concrete under uniaxial compression. These tests as well as additional numerical investigations gave an Understanding about the general load bearing mechanisms. Depending on the reinforcement ratio and the orientation of the textile layers, the two contrary mechanisms act in different intensities. On the one hand the discontinuities result in an early failure caused by the deflections in the compressive stress field and the so introduced lateral tensile stresses. On the other hand, the lateral constrains, which is a result of the bond between the textiles and the concrete, stabilizes the specimens. These two mechanisms are mainly responsible for the anisotropic behavior and the characteristic course of the compressive strength, which is dependent on the angle between the textile layers and the loading direction of carbon concrete and its various failure modes.

Based on the introduced load bearing mechanisms all the test series were compared to each other to show different influence parameters. Firstly, the studies on the influence of the manufacturing process showed that poured specimens always achieved higher strength values than specimens manufactured by hand-lamination. The comparisons concerning parameters such as yarn size, layer spacing, mesh size or a combination of these factors showed that an increasing reinforcement ratio led to strength reduction of the carbon concrete and an increasing anisotropic behavior. In addition to these general parameters different textile arrangements were investigated. A misalignment of each second textile layer or rotated textile orientation of 45° showed no significant impact. Finally, two different impregnations (stiff epoxy and flexible styrene-butadiene based impregnations) were tested. The results demonstrated less strength reduction of

the stiff textiles compared to the flexible reinforcement. The different stiffness of these textiles is mainly responsible for this particular behavior.

Based on the experimental data and the parameter study two possible models which predict the strength reduction of carbon concrete were derived. These two models should form a basis for a general standard and will possibly lead to a wider field of applications. The first model was derived from an anisotropic rock model to approximate the compressive strength of uniaxial loaded carbon concrete at any angle between the textile layers and the loading direction under consideration of the plain concrete strength, layer spacing and the textile volume. The second model gives reduction factors for the uniaxial strength of carbon concrete. These design curves allow a quick and simple calculation of the strength reduction depending on the total textile volume in the specimens and the orientation of the textiles.

Overall, the study was able to show the load bearing behavior of carbon concrete under uniaxial compression as well as the main influence parameters by analyzing the tests and the numerical data. These findings define a first step towards the complete understanding of the behavior of carbon concrete under compression in various construction elements. For a direct transferability of the experimental results to real constructions, further research of multiaxial stress states is necessary. These additional tests should prove or expand the derived models.