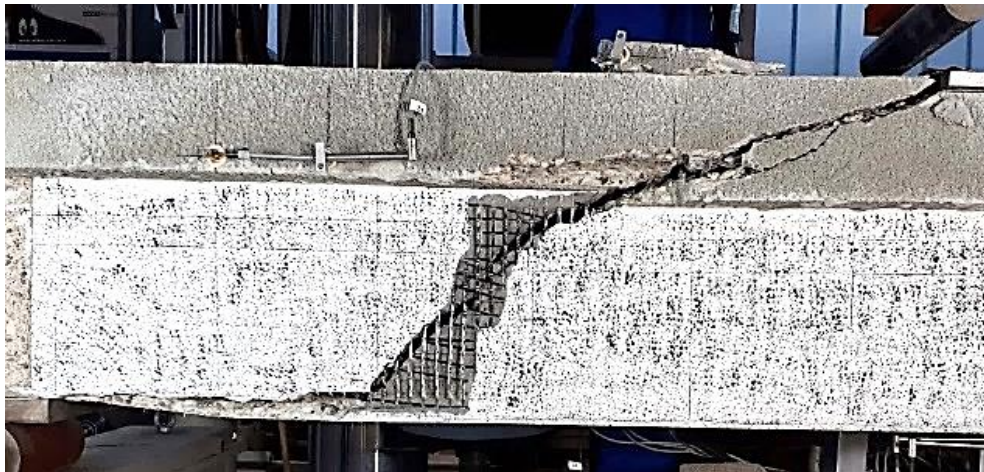


Experimentelle Untersuchungen zum Querkrafttragverhalten von Stahlbetonbauteilen mit Carbonbetonverstärkung unter statischer und zyklischer Belastung

Experimental Investigations to the shear load-bearing of strengthen reinforced concrete structures with carbon reinforced concrete under static and dynamic load



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

Dissertation

von Dipl.-Ing. Sebastian May
geboren am 06. Oktober 1988 in Arnstadt/Thüringen

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Manfred Curbach
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Feix
Prof. Dr.-Ing. Sergej Rempel

Tag der Einreichung: 18.09.2023
Tag der Verteidigung: 19.12.2024

Kurzfassung

Aufgrund der hohen Dichte an älteren Bestandsbauwerken in Deutschland sowie den globalen gesellschaftlichen Herausforderungen bei den Themen Ressourcenverbrauch und CO₂-Emissionen, spielt das nachhaltige Bauen im Bestand eine wichtige Rolle. Oft werden, bedingt durch statische Defizite Bestandsbauwerke entweder mit hohem Energie- und Materialaufwand abgerissen und neu errichtet oder dank minimalinvasiver Ertüchtigungsmethoden verstärkt. Hierbei hat sich in den letzten Jahren der Werkstoff Carbonbeton als besonders effizient und dauerhaft herausgestellt. Aufbauend auf der Darstellung des aktuellen Stands des Wissens zum Querkrafttragverhalten im Allgemeinen, zu ausgewählten normativen und wissenschaftlichen Querkraftmodellen sowie zu bekannten Maßnahmen zur Querkraftverstärkung, werden der Werkstoff Carbonbeton und deren bisherige Anwendung für die Querkraftverstärkung beschrieben. Die in Wissenschaft und Normung vorhandenen Berechnungsmethoden werden anschließend an den durchgeführten Großbauteilversuchen evaluiert.

Im Rahmen der Arbeit werden statische und zyklische Querkraftversuche an Plattenbalken mit zwei unterschiedlichen Geometrien und verschieden aufgebauten Carbonbetonverstärkungen durchgeführt. Insgesamt werden fünf Referenz- und 25 verstärkte Bauteile im Vier-Punkt-Biegeversuch unter statischer Belastung geprüft. Variiert werden dabei die eingesetzten Carbongitter, die Verstärkungsart am Steg, die Lagenanzahl, die Anordnung und die Ausrichtung des Carbongitters in der Verstärkungsschicht sowie die Schubslankheit. Zudem wird der Einfluss einer Vorschädigung des Grundkörpers vor dem Verstärken untersucht. Anhand der Versuche mit Carbonbetonverstärkungen konnten Traglaststeigerungen zwischen 25 bis 50 % experimentell nachgewiesen werden, was die Eignung dieser Querkraftverstärkungsmethode belegt. Der in Deutschland gültige Eurocode 2 zeigt, auf der sicheren Seite liegend, für die nicht verstärkten Stahlbetonbauteile Abweichungen um den Faktor $\sim 2,5$ gegenüber den Versuchslasten auf. Internationale Regelwerke sowie die wissenschaftlichen Modelle lassen eine deutlich genauere Traglastberechnung zu. Die bekannten Modelle zur Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen mit Carbonbetonverstärkung überschätzen das Tragverhalten der geprüften Probekörper, da diese von einem Schubversagen infolge Versagens der Bügel- und/oder Carbonbewehrung ausgehen.

Die zyklischen Bauteilversuche werden über 2×10^6 Lastwechsel auf unterschiedlichen Lastniveaus durchgeführt. Anschließend werden die Bauteile auf die Resttragfähigkeit geprüft. Als Referenz dienen dabei die unverstärkten und verstärkten Probekörper im statischen sowie ein unverstärkter Träger im zyklischen Versuch. Alle zyklisch beanspruchten und verstärkten Probekörper hielten der geforderten Lastwechselzahl stand und versagten bei der Resttragfähigkeitsprüfung auf demselben Lastniveau wie die verstärkten Referenzbalken. Bei dem unverstärkten Probekörper wird hingegen ein Abfall um ~ 30 % infolge einer zyklischen Belastung bei der Resttragfähigkeit festgestellt. Eine Eignung der Carbonbetonverstärkung für zyklisch beanspruchte Bauteile ist somit nachgewiesen.

Bei zahlreichen Querkraftversuchen mit Carbonbetonverstärkung konnte eine erkennbare Grenze bezüglich des maximal möglichen Verstärkungsgrads in Abhängigkeit der vorhandenen Betonzugfestigkeit erkannt werden. Dies lässt sich mit den beobachteten Versagensbildern durch ein Ablösen der Verstärkungsschicht vom Altbetonquerschnitt infolge Querkraftbeanspruchung beschreiben und ist unabhängig von der Lagenanzahl der Carbongitter in der Verstärkungsschicht. Dabei trat das Versagen in der Fuge zwischen Altbeton und Feinbeton sowie im Altbeton

auf. Hierzu wird im Rahmen der Arbeit ein Vorschlag zur Begrenzung der einwirkenden Schubspannung präsentiert.

Aufgrund der Komplexität des Querkrafttragverhaltens von Stahlbetonbauteilen ohne und mit Carbonbetonverstärkung sind weitere grundlegende experimentelle und theoretische Untersuchungen in Zukunft erforderlich. Neben der Umschließung der Biegezugbewehrung an der Unterseite des Plattenbalkenstegs mit der Carbonbetonverstärkung sind zusätzliche Maßnahmen zur Verankerung der Carbongitter in der Druckzone zu erforschen. Des Weiteren muss der Einfluss einer reinen Biegezugverstärkung sowie einer kombinierten Biege- und Querkraftverstärkung mit Carbonbeton auf das Querkrafttragverhalten untersucht werden. Da ältere Bauwerke vor allem mit glattem Stahl bewehrt sind und sich diese Bauteile i. d. R. im gerissenen Zustand II befinden, sind diese Randbedingungen in weiterführenden Versuchen ebenso zu berücksichtigen.

Abstract

Due to the high concentration of aging existing infrastructure in Germany and the global societal challenges surrounding resource consumption and CO₂ emissions, sustainable retrofitting of existing structures plays a pivotal role. Frequently, due to structural deficiencies, existing structures are either demolished and reconstructed with substantial energy and material expenditure or reinforced through minimally invasive retrofitting techniques. In recent years, carbon-fiber-reinforced concrete (carbon concrete) has emerged as an exceptionally efficient and durable material for this purpose. Building upon an exposition of the current state of knowledge regarding shear behaviour in general, selected normative and scientific shear models, as well as established methods for shear reinforcement, this study elaborates on the properties of carbon concrete and its historical applications in shear strengthening. Subsequently, the existing calculation methods in both scientific research and industry standards are evaluated based on comprehensive large-scale structural tests.

Within the scope of this research, static and cyclic shear tests are conducted on plate-beams featuring two distinct geometries and diverse carbon concrete reinforcement configurations. In total, five reference specimens and 25 reinforced components undergo testing in a four-point bending experiment under static loading conditions. Parameters under scrutiny encompass the employed carbon-fiber grids, reinforcement methodologies at the web, the number of layers, the arrangement and orientation of the carbon-fiber grids within the reinforcement layer, as well as the shear span-to-depth ratio. Furthermore, the impact of pre-existing structural damage to the base material prior to reinforcement is examined. Based on the experimental results from tests with carbon concrete reinforcements, it is empirically demonstrated that load-bearing capacity enhancements ranging from 25 % to 50 % can be achieved, affirming the effectiveness of this shear strengthening approach. The German Eurocode 2, which tends to adopt a conservative stance, displays deviations of approximately a factor of ~ 2.5 in comparison to the test loads for unreinforced concrete components. Conversely, international standards and refined scientific models permit notably more precise load-bearing capacity calculations. Nevertheless, the established models for shear strength of components enhanced with carbon concrete overestimate the load-bearing behaviour of the analysed specimens, as they presume shear failure due to the failure of stirrups and/or carbon reinforcement.

Cyclic component tests are carried out over 2×10^6 load cycles at varying load levels. Subsequently, the components are subjected to residual load-bearing capacity assessments. The unreinforced and reinforced specimens from the static tests, as well as an unreinforced beam from the cyclic test, serve as references. All cyclically loaded and reinforced specimens endure the requisite number of load cycles and fail at the same load level as the reinforced reference beams. In contrast, a reduction of approximately 30 % in residual load capacity is observed for the unreinforced specimen due to cyclic loading. Thus, the suitability of carbon concrete reinforcement for cyclically loaded components is substantiated.

In numerous shear tests involving carbon concrete reinforcement, a discernible limit concerning the maximum achievable degree of reinforcement becomes evident, contingent upon the tensile strength of the existing concrete. This limitation can be described by the observed failure modes, wherein the reinforcement layer detaches from the old concrete cross-section due to transverse tensile stress, irrespective of the number of layers of the carbon-fiber grid in the reinforcement

layer. Failure manifests within the interface between the old concrete and fine concrete, as well as within the old concrete itself. In the context of this research, a proposal for constraining the applied shear stress is presented.

Given the intricacies surrounding shear behaviour in reinforced concrete components with and without carbon concrete reinforcement, further fundamental experimental and theoretical investigations are imperative. Apart from encapsulating the lower tension reinforcement of the slab-beam web with carbon concrete reinforcement, additional measures for anchoring the carbon grids within the compression zone necessitate exploration. Furthermore, an examination of the influence of pure flexural reinforcement and combined flexural and shear reinforcement with carbon concrete on shear behaviour is warranted. Given that older structures are predominantly reinforced with smooth steel and these components generally exist in a cracked state, these boundary conditions must be duly considered in subsequent experiments.