

Lokales Verbundverhalten von Stahlbeton unter Kurzzeit- und Langzeitbelastung

Local bond behaviour of reinforced concrete
under short-term and long-term loading

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

Dissertation

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Marc Koschemann

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

Prof. Dr.-Ing. Jan Hofmann

Univ.-Prof. i.R. Dr.-Ing. habil. Nguyen Viet Tue

eingereicht am: 04.01.2024

verteidigt am. 30.04.2024

Kurzfassung

Die Verbundwirkung zwischen Stahl und Beton stellt die essentielle Grundlage für die Funktionsweise von Stahlbetonbauteilen dar und beeinflusst deren Trag- und Verformungsverhalten maßgeblich. Darüber hinaus sind Rissabstände und Rissbreiten sowie die Mitwirkung des Betons auf Zug zwischen den Rissen vom Verbundverhalten abhängig. Für die Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit von Gebäuden ist es notwendig die Rissbreiten zu begrenzen. Dies gilt insbesondere für Bauwerke der kritischen Infrastruktur, wie Zwischenlager für Brennelemente, welche häufig länger genutzt werden als ursprünglich geplant. Aufgrund des zeitabhängigen Verhaltens von Beton verändert sich die Verbundwirkung während der Nutzungsdauer von Bauwerken, was zu einer Zunahme der Rissbreiten führt. Eine realitätsnahe Zustandsbewertung im Hinblick auf die verlängerte Beanspruchungsdauer setzt daher eine genaue Kenntnis des Verbundverhaltens und der Rissbreitenentwicklung unter Kurzzeit- und Langzeitbelastung voraus.

Die Basis der vorliegenden Arbeit bildet eine umfassende Literaturrecherche zu bestehenden Verbundmodellen, den Einflüssen auf das Verbundverhalten und dessen experimentelle Ermittlung sowie die Auswirkungen einer Langzeitbelastung auf den Verbund und die Breite von Rissen.

Im Rahmen der Arbeit wurde der Einfluss der Betonfestigkeit, der Verbundlänge und der Probekörperart auf das lokale Verbundverhalten unter Kurzzeit- und Langzeitbelastung untersucht. Dazu wurden insgesamt 132 Verbundversuche an Auszieh- und Balkenendkörpern durchgeführt. Um Informationen über den örtlichen und zeitlichen Verlauf der Verbundkraftübertragung entlang der Einbettungslänge zu erlangen, wurden faseroptische Sensoren auf den Bewehrungsstäben appliziert und damit die Stahldehnungsverteilung erfasst.

Auf Grundlage der Ergebnisse von Versuchen mit einer sehr kurzen Verbundlänge wurden analytische Beschreibungen des lokalen Verbundspannungs-Schlupf-Verhaltens unter Kurzzeitbelastung in Abhängigkeit der Versagensart formuliert. Dabei nimmt der Verbundwiderstand im Falle eines Ausziehversagens nahezu linear mit der Betondruckfestigkeit und bei Auftreten von Spaltrissen in Abhängigkeit der Spaltzugfestigkeit zu. Des Weiteren nimmt die Bruchverschiebung mit zunehmender Betonfestigkeit ab. Gegenüber dem lokalen Verbundmodell des *fib* MODEL CODE 2010 weisen die hergeleiteten Beziehungen ein steiferes Verbundverhalten auf. Die Vergrößerung der Verbundlänge im Versuch hatte eine Abnahme der gemittelten Verbundspannung zur Folge. Insbesondere bei Balkenendversuchen hat die Verbundlänge einen maßgeblichen Einfluss auf den Entstehungszeitpunkt von Spaltrissen und damit auf den Verbundwiderstand.

Anhand der gemessenen Dehnungen an unterschiedlichen Applikationsorten am Stab konnten Aussagen über die Spannungsverteilung innerhalb des Stabs und über den örtlichen Einfluss der Rippen abgeleitet werden. Die experimentell gewonnen Erkenntnisse wurden durch numerische Simulationen mit diskreter Modellierung der Rippen qualitativ bestätigt. Mithilfe der faseroptischen Sensoren konnte nachgewiesen werden, dass die Kraftübertragung auch bei sehr kurzen Verbundlängen ungleichmäßig erfolgt und dass das Verbundverhalten eine Ortsabhängigkeit besitzt. Dies trifft im besonderen Maße auf lastnahe Verbundabschnitte zu, welche aufgrund des Ausbruchverhaltens des Betons einen Bereich gestörten Verbunds darstellen. Auf Grundlage der ermittelten Verbundspannungsverteilungen wurde ein Ansatz zur Abminderung des Verbundwiderstands für diesen Bereich formuliert.

In den Verbundversuchen unter Langzeitbelastung wurden deutliche Verformungszuwächse während der Belastungsdauer aufgezeichnet, welche keine Abhängigkeit von der Verbundlänge und nur einen geringen Einfluss von der Betonfestigkeit aufwiesen. Bestehende Modelle unterschätzen den

Effekt des Verbundkriechens. Der vorgeschlagene Berechnungsansatz kann mit der lokalen Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung verknüpft und die Schlupfzunahme für eine beliebige Belastungsdauer bestimmt werden.

Zur Untersuchung der Rissbreitenentwicklung unter Dauerlast wurden Dehnkörperversuche mit einem zentrisch einbetonierten Stab und unterschiedlichen Querschnittsabmessungen durchgeführt. Mithilfe faseroptischer Sensoren wurde während einer Langzeitbelastung von 1.000 h eine Rissbreitenzunahme von bis zu 20 % ermittelt. Aus den Dehnkörperversuchen ließ sich ableiten, dass die Auswirkungen des Verbundkriechens auf die Rissbreite mit zunehmendem Bewehrungsgrad und zunehmendem Belastungsniveau abnehmen.

Unter Anwendung der schrittweisen Integration der Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes wurden vergleichende Berechnungen auf Basis bestehender Modelle zum Verbund und zum Verbundkriechen sowie den hergeleiteten lokalen Beziehungen durchgeführt. Die berechneten Schlupf- und Verbundspannungsverteilungen weisen im Vergleich mit den versuchstechnisch ermittelten Verläufen ein hohes Maß an Übereinstimmung auf. Größere Abweichungen wurden im Falle eines Spaltbruchversagens erzielt. Die in den Dehnkörperversuchen ermittelten Rissbreiten konnten anhand der hergeleiteten Beziehungen für kleine Querschnittsabmessungen zutreffend prognostiziert werden, während mit dem Verbundmodell des *fib* MODEL CODE 2010 die Rissbreiten überschätzt werden. Die Berechnungsergebnisse zur Rissbreitenzunahme infolge Verbundkriechens bestätigen die in den Versuchen gewonnen Erkenntnisse qualitativ.

Abschließend erfolgt eine kompakte Zusammenfassung der wichtigsten technischen und wissenschaftlichen Ergebnisse und gewonnen Erkenntnisse zum lokalen Verbundverhalten und dessen Einfluss auf die Rissbreitenentwicklung unter Langzeitbelastung.

Abstract

The bond between steel and concrete is the essential basis for the functioning of reinforced concrete components and has a significant influence on their load-bearing and deformation behavior. In addition, crack spacing and crack widths as well as the tension stiffening effect depend on the bond behavior. To ensure the serviceability and durability of buildings, it is necessary to limit the crack widths. This applies in particular to critical infrastructure structures, such as interim storage facilities for radioactive materials, which are often used for longer than originally planned. Due to the time-dependent behavior of concrete, the bonding effect changes during the service life of structures, which leads to an increase in crack widths. A realistic condition assessment with regard to the extended load duration therefore requires precise knowledge of the bond behavior and the development of crack widths under short-term and long-term loading.

The basis of the present work is a comprehensive literature research on existing bond models, the influences on the bond behavior and its experimental determination as well as the effects of long-term loading on the bond and the width of cracks.

Within the scope of the work, the influence of concrete strength, bond length and specimen type on the local bond behavior under short-term and long-term loading was investigated. A total of 132 bond tests were carried out on pull-out and beam end specimens. In order to obtain information about the local and temporal course of the bond force transmission along the embedment length, fiber optic sensors were applied to the reinforcing bars and the steel strain distribution was recorded.

Based on the results of tests with a very short bond length, an analytical description of the local bond stress-slip behavior under short-term loading was formulated as a function of the failure mode. The bond resistance increases linearly with the concrete compressive strength in the case of pull-out failure and as a function of the splitting tensile strength in the event of splitting cracks. Furthermore, the fracture displacement decreases with increasing concrete strength. Compared to the local bond model of *fib* MODEL CODE 2010, the derived relationships show a stiffer bond behavior. Increasing the bond length in the test resulted in a decrease in the average bond stress. Particularly in beam end tests, the bond length has a significant influence on the time of formation of splitting cracks and thus on the bond resistance.

On the basis of the measured strains at different application locations on the bar, it was possible to derive statements about the stress distribution within the bar and about the local influence of the ribs. The experimental findings were qualitatively confirmed by numerical simulations with discrete modeling of the ribs. With the help of the fiber optic sensors, it was possible to prove that the force transmission is uneven even with very short bond lengths and that the bond behavior has a spatial dependency. This applies in particular to bond sections close to the load, which represent an area of disturbed bond due to the break-out behavior of the concrete. Based on the determined bond stress distributions, an approach was formulated to reduce the bond resistance for this area.

In the bond tests under long-term loading, significant deformation increases were recorded during the loading period, which showed no dependence on the bond length and only a slight influence of the concrete strength. The proposed calculation approach can be linked to the local bond stress-slip relationship and the slip increase can be determined for any load duration.

To investigate the development of crack widths under sustained load, tension tie tests were carried out with a bar centrally embedded in concrete and different cross-sectional dimensions. By means of fibre-optic sensors, an increase in crack width of up to 20 % was determined during a long-term

load of 1,000 hours. The results of the tension tie tests showed that the effects of bond creep on the crack width decrease with increasing degree of reinforcement and increasing load level.

By applying the stepwise integration of the differential equation of sliding bond, comparative calculations were carried out on the basis of existing models for the bond and bond creep as well as the derived local relationships. The calculated slip and bond stress distributions show a high degree of agreement in comparison with the experimentally determined curves. Larger deviations were achieved in the case of a splitting failure. The crack widths determined in the tension tie tests could be accurately predicted for small cross-section dimensions using the derived relationships, while the bond model of *fib* MODEL CODE 2010 results in an overestimation of the crack width. The calculated results for the increase in crack widths due to bond creep qualitatively confirm the findings obtained in the tests.

Finally, a compact summary of the most important technical and scientific results and findings on the local bond behavior and the influence on crack width development under long-term loading is provided.