



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Bauingenieurwesen Institut für Massivbau

**Bond of reinforcement in concrete
under high loading rates:
A finite element analysis of structural effects**

**Verbund zwischen Beton und Bewehrung
bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten:
Eine Finite-Elemente-Analyse
struktureller Effekte**

Dissertation

**vorgelegt an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung der Würde eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -**

von
Evmorfia Panteki
geboren am 17.06.1991 in Athen

Gutachter
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häussler-Combe
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser

Dresden 2018

Abstract

The bond between concrete and reinforcing steel is fundamental to the load bearing capacity of reinforced concrete structures. It has been investigated intensively under static conditions. By contrast, comparably little attention has been paid to the investigation of bond behaviour under dynamic loading. Several experimental studies indicate strength or rather resistance enhancements coming with increasingly dynamic loading. This applies for concrete and steel as well as the bond between them. The phenomenon is known as strain rate or rather loading rate effect. To date still not enough investigations have been undertaken to assess its causes with certainty.

The work presented herein provides a numerical view of the bond of reinforcement in concrete and investigates its loading rate dependent behaviour. Finite element analyses focusing on structural and inertia effects are carried out. The contribution of material effects to strength or rather resistance enhancements is of rather secondary interest. Modelling is conducted at the rib scale, where bond is predominately controlled by mechanical interaction. By contrast, most numerical approaches adopted so far captured bond phenomenologically with the use of empirically determined bond stress-slip relationships.

In the first step, the model was developed and calibrated. Its quality, credibility, and limitations were assessed by a series of numerical case studies. The results were compared with available experimental data, insights into the inner local specimen state were provided, and recommendations on applicable bond stress-slip evaluation methods given. The interplay of numerical and analytical methods was exemplified and guidelines for optimising experimental set-up designs were developed. Numerical parametric studies followed. The loading rate dependence of bond was featured, loading rate dependent characteristics were identified, and conclusions on causes of the phenomenon drawn. It was shown that structural effects are strongly involved in the loading rate effect. The same holds for hydrostatic pressure stress states and inertia effects. Not only the bond strength but also the bond stiffness, the energy absorption capacity, and the specimen failure mode were found loading rate dependent. Under high loading rates, the load got introduced into the specimen faster than the cracks could propagate inside the concrete. Multiple cracking was the result and was increasingly observed the higher the loading rates got.

Examination of the influence of concrete inhomogeneity on the loading rate dependent behaviour of bond was also undertaken. The model was modified and random distribution fields were implemented. The higher the loading rate was, the more pronounced the scattering of data was found. This implicates that a larger number of tests is necessary to provide an adequate statistical basis for results achieved under dynamic loading as compared to static loading.

The thesis concluded in reviewing currently available methods for incorporating the results into simulations of whole reinforced concrete structures. Further investigations and developments are necessary in order to design dynamic loading-resistant structures with the use of commercial FE-programs and design codes in the future.

Kurzfassung

Der Verbund zwischen Beton und Bewehrungsstahl ist von großer Bedeutung für die Tragfähigkeit von Stahlbetonkonstruktionen. Er wurde unter statischen Bedingungen bereits intensiv untersucht. Vergleichsweise wenig erforscht ist hingegen das Verbundverhalten unter dynamischer Belastung. Mehrere experimentelle Studien deuten daraufhin, dass mit zunehmend dynamischer Belastung eine Erhöhung der Festigkeit bzw. des Widerstandes einhergeht. Dies gilt sowohl für Beton und Stahl als auch für den Verbund zwischen ihnen. Das Phänomen ist als Dehnraten- bzw. Belastungsrateneffekt bekannt. Bis heute liegen nicht genügend Untersuchungen zu einer abschließenden Bewertung seiner Ursachen vor.

Die vorliegende Arbeit untersucht das belastungsratenabhängige Verbundverhalten zwischen Beton und Bewehrungsstahl numerisch. Finite-Elemente-Analysen mit dem Fokus auf strukturellen und trägheitsbedingten Effekten werden durchgeführt. Eher im Hintergrund steht der Beitrag von Materialeffekten an Festigkeits- bzw. Widerstandssteigerungen. Die Modellierung wird auf Rippenebene realisiert, sodass der Verbund vorwiegend durch die mechanische Interaktion zwischen Beton und Bewehrungsstahl zustande kommt. Im Gegensatz dazu wurde das Verbundverhalten bei den meisten bisher verwendeten Ansätzen durch die Implementierung empirisch bestimmter Verbundspannungs-Schlupf-Beziehungen phänomenologisch berücksichtigt.

Zunächst wurde das Modell entwickelt und kalibriert. Seine Eignung, Plausibilität und Einschränkungen wurden mittels numerischer Fallstudien erfasst. Simulationsergebnisse wurden mit verfügbaren experimentellen Daten verglichen, Einblicke in den inneren lokalen Zustand des Probekörpers ermöglicht und Empfehlungen zur Auswertung der Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung gegeben. Das Zusammenspiel numerischer und analytischer Methoden wurde veranschaulicht und Leitlinien zur Optimierung experimenteller Aufbauten wurden erarbeitet. Numerische Parameterstudien folgten. Die Abhängigkeit des Verbundverhaltens von der Belastungsrate wurde dargestellt, belastungsratenabhängige Eigenschaften konnten identifiziert und Rückschlüsse auf Ursachen des Phänomens gezogen werden. Es wurde gezeigt, dass der Belastungsrateneffekt maßgeblich von strukturellen Effekten bestimmt wird. Ebenfalls von Bedeutung sind hydrostatische Spannungszustände und trägheitsbedingte Effekte. Neben der Verbundfestigkeit erwiesen sich auch die Verbundsteifigkeit, die Energieabsorptionsfähigkeit und die Versagensart des Probekörpers als belastungsratenabhängig. Bei hohen Belastungsraten wurde die Last schneller in den Probekörper eingetragen, als sich Risse im Beton ausbreiten konnten. Mehrfachrissbildung war die Folge und trat umso stärker auf, je höher die Belastungsrate war.

Der Einfluss der Betoninhomogenität auf das belastungsratenabhängige Verbundverhalten wurde ebenfalls untersucht. Das Modell wurde modifiziert und Zufallsfelder wurden implementiert. Je höher die Belastungsrate war, desto ausgeprägter streuten die Ergebnisse. Dies impliziert, dass unter dynamischer Belastung im Vergleich zu statischer Belastung eine größere Anzahl an Versuchen für die statistische Absicherung der Ergebnisse notwendig ist.

Abschließend wurden derzeit verfügbare Methoden zur Übertragung der Ergebnisse auf Simulationen gesamter Stahlbetonkonstruktionen bewertet. Es bedarf weiterer Untersuchungen und Entwicklungen, um in Zukunft Bauwerke mittels kommerzieller FE-Programme und Bemessungskonzepten gegen dynamische Einwirkungen auslegen zu können.