

Schädigungsentwicklung und Spannungsumlagerungen in ermüdungsbeanspruchten Betondruckzonen

Von der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)**

genehmigte Dissertation von

Dennis Birkner, M. Sc.

geboren am 13.08.1992 in Hannover

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Josef Hegger

Prof. Dr.-Ing. Stefan Löhnert

eingereicht am 21.06.2024

verteidigt am 26.09.2024

Abstract

The fatigue behavior of concrete has so far been studied intensively in the literature using centrally loaded cylindrical specimens. Only a few studies have been carried out on concrete structures subjected to cyclic bending loads. Such structures can be found in wind turbine towers, for example. Research results for high-strength concrete, which is usually used in such structures, are even scarcer. Due to the high number of occurring load cycles and the large cross-sectional dimensions, the testing of the fatigue behavior of such structures is associated with major challenges. Numerical simulations, in contrast, enable the investigation of a large number of parameter variations within a very short period of time, which accelerates the investigation of the fatigue behavior of components. The used material models quickly become very complex and require time-consuming calibration of the input parameters in structural tests. A model for simulating the macroscopic damage processes in concrete subjected to fatigue loading in compressed cross-sections, which can be calibrated using standard cylinder tests, does not yet exist.

The present work addresses these aspects and implements an additive strain model to simulate the damage development and stress redistributions in fatigue-loaded concrete compression zones. A three-step approach was chosen for this. In the first step, experimental investigations were designed and carried out. The tests are essential for the numerical model and were carried out on cylindrical and beam-shaped specimens. The input parameters for the material model were determined from static and cyclic tests on the concrete cylinders and the beam tests were used to validate the model. The beam tests were carried out in a resonance-based testing facility, which allowed the realization of the required high forces with load frequencies of 19 Hz. This made it possible to apply the high number of load cycles in a short time. In the second step, the strain model was implemented in the simulation procedure of the finite element software ANSYS Mechanical. The functions for the stiffness and strain development were derived from cylinder tests. In the third step, the numerical implementation was validated using the beam tests. Different phenomena were considered, such as the temperature and strain development as well as the changes in material stiffness and the resulting stress redistributions in the cross-section.

In the experimental investigations of the beam specimens, fatigue failure due to spalling of the concrete compression zone or complete destruction of the beams was achieved using the resonance-based testing facility. All beams endured significantly more load cycles than the number of cycles to failure according to *fib* Model Code 2010. This was due to early damage and a reduction in stiffness in the most heavily loaded regions, which subsequently led to a reduction in stresses. The numerical simulations confirmed the effects observed in the beam tests. In particular, the model was able to simulate the most damaged regions very well. Moreover, it was shown that stresses redistributed to less heavily loaded regions as a result of the relief of the damaged regions. This confirmed the positive effect of stress redistributions on the fatigue life of the structures. The model can be used to carry out parameter studies with varying load levels or degrees of prestressing, for example, in order to gain valuable insights into the predimensioning of fatigue-loaded structures and to identify critical locations in the geometry. For more detailed conclusions, additional tests have to be carried out in order to expand the numerical model to a wider range of parameters.

Keywords: Concrete, Fatigue, Stress Redistribution, Damage, FEM, ANSYS, Additive Strain Model

Kurzfassung

Das Ermüdungsverhalten von Beton wurde in der Literatur bislang sehr ausführlich anhand von zentrisch beanspruchten Zylinderprobekörpern untersucht. Untersuchungen, die sich mit zyklisch biegebeanspruchten Betonbauteilen im Druckschwellbereich beschäftigen, existieren nur in geringer Zahl. Solche Bauteile sind beispielsweise in Turmstrukturen von Windenergieanlagen vorhanden, die aktuell in großem Umfang errichtet werden. Für hochfesten Beton, wie er in diesen Bauwerken meist verwendet wird, liegen noch weniger Untersuchungsergebnisse vor. Aufgrund der hohen auftretenden Lastwechselzahlen und der großen Querschnittsabmessungen ist die versuchstechnische Untersuchung des Ermüdungsverhaltens solcher Strukturen mit großen Herausforderungen verbunden. Mit Hilfe von numerischen Simulationen kann hingegen eine Vielzahl an Parametervariationen innerhalb kürzester Zeit untersucht werden, wodurch eine beschleunigte Untersuchung des Ermüdungsverhaltens von Bauteilen möglich wird. Die dafür verwendeten Materialmodelle werden schnell sehr komplex und benötigen eine aufwendige Kalibrierung der Eingangsparameter an Bauteilversuchen. Ein Modell zur Abbildung der makroskopischen Schädigungsprozesse im Beton unter Ermüdungsbeanspruchung in Querschnitten unter Druckschwellbeanspruchung, das anhand von üblichen Zylinderversuchen kalibriert werden kann, existiert bisher nicht.

In der vorliegenden Arbeit wurden diese Punkte aufgegriffen und ein Modell zur Simulation der Schädigungsentwicklung und von Spannungsumlagerungen in ermüdungsbeanspruchten Betondruckzonen numerisch implementiert. Hierfür wurde ein dreistufiges Vorgehen gewählt. Im ersten Schritt wurden experimentelle Untersuchungen konzipiert und durchgeführt. Die Versuche waren eine wichtige Grundlage für das numerische Modell und wurden an zylindrischen und balkenförmigen Probekörpern durchgeführt. Aus statischen und zyklischen Versuchen an den Betonzylindern wurden die Eingangsparameter für das Materialmodell ermittelt und die Balkenversuche dienten zur Validierung des Modells. Diese wurden in einem Resonanzprüfstand durchgeführt, mit dem sich die erforderlichen großen Kräfte mit Belastungsfrequenzen von 19 Hz realisieren ließen. Damit konnten die hohen auftretenden Lastwechselzahlen in kurzer Zeit erreicht werden. Im zweiten Schritt wurde ein additives Dehnungsmodell in den Berechnungsablauf der Finite-Elemente-Software ANSYS Mechanical implementiert. Die zugrundeliegenden Funktionen für die Steifigkeits- und Dehnungsverläufe wurden aus Zylinderversuchen abgeleitet. Im dritten Schritt erfolgte die Validierung der numerischen Implementierung anhand der Balkenversuche. Es wurden unterschiedliche Phänomene betrachtet, wie z. B. die Temperatur- und Dehnungsentwicklung sowie die Veränderungen in der Materialsteifigkeit und die daraus resultierenden Spannungsumlagerungen im Querschnitt.

In den experimentellen Untersuchungen der Balkenprobekörper wurde mit der Resonanzprüfmethode ein Ermüdungsversagen durch Abplatzen der Betondruckzone oder durch eine vollständige Zerstörung der Balken erzielt. Die ertragenen Lastwechselzahlen aller Balken lagen deutlich über den Bruchlastwechselzahlen nach *fib* Model Code 2010. Die Ursache dafür ist eine frühe Schädigung und Steifigkeitsabnahme der am stärksten beanspruchten Bereiche, die dort zu einer nachfolgenden Verringerung der Spannungen führte. In den numerischen Nachrechnungen konnten die in den Balkenversuchen beobachteten Effekte bestätigt werden. Vor allem die am stärksten geschädigten Bereiche konnten mit dem Modell sehr gut abgebildet werden. Es wurde zudem gezeigt, dass sich infolge der Entlastung der geschädigten Bereiche Spannungen in weniger stark beanspruchte Bereiche umlagerten. Dies bestätigte die positive Wirkung der Spannungsumlagerungen auf die Ermüdungslebensdauer der

Bauteile. Mit dem Modell können Parameterstudien mit z. B. variierenden Belastungsniveaus oder Vorspannungsgraden durchgeführt werden, um wertvolle Erkenntnisse zur Vordimensionierung ermüdungsbeanspruchter Bauteile und zur Identifikation markanter Stellen in der Geometrie zu gewinnen. Für weiterführende Aussagen ist die Durchführung zusätzlicher Versuche notwendig, um das numerische Modell auf ein breiteres Parameterspektrum zu erweitern.

Stichworte: Beton, Ermüdung, Spannungumlagerung, Schädigung, FEM, ANSYS, additives Dehnungsmodell