
Analyse des Ermüdungsprozesses von hochfestem Beton unter Berücksichtigung der Probengröße

Dissertation

von der Fakultät für Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung des Grades
Doktor Ingenieur (Dr.-Ing.)

eingereicht von
M. Sc. Vivian Frei
geboren am 21.01.1991 in Engen

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx
Dr.-Ing. Marc Thiele
Prof. Dr.-Ing. habil. Frohmut Wellner

Tag der Verteidigung: 30.09.2024

Kurzfassung

Für die Bemessung gegen Ermüdung stellt die Übertragbarkeit von Laborergebnissen auf bauteilrelevante Abmessungen eine große Herausforderung dar. Die Frage der Übertragbarkeit stellt sich bezüglich des Größeneffekts in Anbetracht immer größer werdender Strukturen, wie Windenergieanlagen und Brücken, sowie hinsichtlich der Eigenschaften hochfester Betonzusammensetzungen. Sie sind von besonderem Interesse für die Ermüdung, weil mit zunehmender Betondruckfestigkeit das Verhältnis von zyklischen zu statischen Lasten zunimmt. Von diesen und weiteren Einflussfaktoren hängt die Schädigungsentwicklung ab, welche mit einer lebensdauerbegleitenden Schädigungsanalyse charakterisiert werden kann. Eine zuverlässige Schädigungsanalyse ermöglicht zusätzlich die Erfassung des Istzustands gealterter Bauwerke. Eine fundierte Bewertung der Schädigungsentwicklung baut dabei auf einem umfassenden Verständnis des Ermüdungsprozesses auf.

Folglich ist es das Ziel dieser Arbeit den Ermüdungsprozess unter Druckschwellbelastung an drei Druckfestigkeiten und drei Probengrößen mit mechanischen und akustischen Prüfmethode zu analysieren. Die Hypothese ist, dass mit zunehmender Druckfestigkeit und Probengröße die auftretenden Probenveränderungen abnehmen bzw. die Sprödigkeit zunimmt. Sie basiert auf einem bruchmechanischen Modellansatz des Größeneffekts, nach welchem der Volumenanteil einer lokal begrenzten, anisotropen Schädigungszone am Probenvolumen mit zunehmender Probengröße und Homogenität des Gefüges abnimmt.

Das Auftreten einer Schädigungszone in der dritten Ermüdungsphase kann in hochfestem Beton sowohl mit der Schallemissionsortung und der Ultraschallprüfung gezeigt werden. Mit letzterer wird die anisotrope Entwicklung der Ultraschallgeschwindigkeit analysiert. Zudem wird das bevorzugt lastparallele Risswachstum bei der Belastung im oberen Spannungsbereich mit einer Zunahme der plastischen Energiedichte in Verbindung gebracht.

Mit zunehmender Druckfestigkeit wird eine abnehmende Veränderung plastischer Probeneigenschaften wie der Verdichtung und der axialen Dehnung festgestellt. Die Ultraschallgeschwindigkeit und die Steifigkeit zeigen bei hochfestem Beton geringere Veränderungen als bei normalfestem Beton. Der Einfluss der Zusammensetzung wird anhand der geprüften normal und hochfesten Betone diskutiert. Mit zunehmender Probengröße ist bei der Zusammensetzung HFB-2 eine abnehmende Veränderung einiger Probeneigenschaften am Ende der Lebensdauer festzustellen, während bei der Zusammensetzung HFB-1 keine Größenabhängigkeit beobachtet wird.

Der bruchmechanische Modellansatz kann die beobachtete Abhängigkeit des Ermüdungsprozess auf der Probenebene von der Probengröße und der Druckfestigkeit weitestgehend erklären. Aufgrund des Zusammenhangs lastparalleler Risse mit der Querdehnung bzw. des aus der Ultraschallgeschwindigkeit senkrecht zur Lastrichtung abgeleiteten dynamischen E-Moduls, werden diese Probeneigenschaften als Schädigungsindikatoren diskutiert.

Stichworte: Ermüdung, hochfester Beton, Ermüdungsprozess, Ultraschallprüfung, Codawelleninterferometrie, Schallemissionsprüfung, Größeneffekt

Abstract

For fatigue design, the transferability of laboratory results to structural dimensions presents a major challenge. The issue of transferability arises with regard to the size effect, considering the ever-increasing scale of structures such as wind turbines or bridges, as well as the properties of high-strength concrete mixtures. These are of particular interest for fatigue, because as concrete compressive strength increases, the ratio of cyclic to static loads also increases. The damage development depends on these and other influencing factors, which can be characterized through a damage analysis that accompanies the entire service life. A reliable damage analysis also enables the assessment of the current condition of aged structures. A sound evaluation of damage development is based on a comprehensive understanding of the fatigue process.

Consequently, the aim of this work is to analyse the fatigue process under compressive cyclic loading at three compressive strengths and three specimen sizes using mechanical and acoustic testing methods. The hypothesis is that with increasing compressive strength and specimen size, the occurring specimen changes decrease, or the brittleness increases. This is based on a fracture mechanics size effect model, according to which the volume fraction of a locally confined, anisotropic fracture damage zone in the specimen volume decreases with increasing specimen size and homogeneity of the microstructure.

The occurrence of a fracture damage zone in the third fatigue phase can be demonstrated in high-strength concrete using both acoustic emission source localisation or ultrasonic testing. The latter is used to analyse the anisotropic development of the ultrasonic pulse velocity. Additionally, the preferential crack growth parallel to the load direction under high stress levels is associated with an increase in plastic energy density.

With increasing compressive strength, a decrease in changes to the plastic specimen properties, such as compaction and axial strain, is observed. The ultrasonic velocity and stiffness show smaller changes in high-strength concrete compared to normal-strength concrete. The influence of the composition is discussed using the tested normal and high strength concretes. With increasing specimen size, a decrease of the change of some specimen properties is determined for the composition HFB-2, while no size dependency is noted in composition HFB-1.

The fracture mechanics model can largely explain the observed dependence of the fatigue process at the specimen scale on specimen size and compressive strength. Due to the relation of load-parallel cracks with transverse strain and the dynamic modulus of elasticity derived from the ultrasonic pulse velocity perpendicular to the load direction, these specimen properties are discussed as damage indicators.

Keywords: fatigue, high-strength concrete, fatigue process, ultrasonic testing, coda wave interferometry, acoustic emission testing, size effect