

DISSERTATION

Berücksichtigung von Temperaturfeldern bei
Ermüdungsversuchen an UHPC

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

Dr.-Ing.

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden

Name: Melchior Deutscher

Einreichung: 10. Januar 2022

Disputation: 21. November 2022

Kurzfassung

Die Anforderungen an Baumaterialien steigen durch immer schlankere und höhere Tragwerke. Im Massivbau geht daher seit längerem die Materialentwicklung hin zu hochfesten und ultrahochfesten Betonen. Neben der steigenden statischen Beanspruchung nimmt gleichzeitig, bedingt durch immer ausgereiztere Konstruktionen, die Bedeutung der Ermüdungsfestigkeit zu. Deswegen liegt der Fokus der Forschung im Bereich der Hochleistungsbetone aktuell vor allem auf der Widerstandsfähigkeit gegenüber zyklischen Beanspruchungen. Dabei wurde in verschiedenen Forschungsvorhaben bei höheren Prüfgeschwindigkeiten bei Druckschwellversuchen zur Erzeugung von Wöhlerlinien eine Erwärmung der Probekörper festgestellt. Diese Arbeit widmet sich dieser Thematik bezogen auf ultrahochfesten Beton.

Mit einer umfangreichen Parameterstudie konnte ein Überblick über maßgebende Einflussgrößen auf den Erwärmungsprozess gegeben werden. Als wichtigste Ursachen für die Temperaturerzeugung wurde zum einen ein inneres Reibungspotenzial festgestellt, welches mit geringer werdendem Größtkorn und durch wachsende Schädigung ansteigt. Zum anderen ist die eingetragene Energie pro Lastwechsel entscheidend. Anders als die Ermüdungsfestigkeit von Beton, die vor allem von der Oberspannung abhängig ist, ist die Erwärmung pro Lastwechsel von der Spannungsamplitude abhängig. Die Prüfgeschwindigkeit beeinflusst die messbare Erwärmung hingegen nur durch die Veränderung des Zeitraums, der pro Lastwechsel zur Temperaturabgabe zur Verfügung steht. Die Temperaturgenerierung pro Lastwechsel ist hingegen frequenzunabhängig.

Ein negativer Einfluss der Probekörpererwärmung zeigt sich vor allem bei der deutlichen Reduzierung der Bruchlastwechselzahlen im Vergleich zu Versuchen, bei denen kein deutlicher Temperaturanstieg zu verzeichnen war. Basierend auf bisherigen Arbeiten zu hochfesten Betonen schlagen deswegen verschiedene Autoren eine Anpassung des Versuchsablaufs zur Begrenzung der Temperaturentwicklung im Probekörper vor. Die vorliegende Arbeit zeigt im Gegensatz dazu eine Methode auf, bei der die Erwärmung zugunsten einer zeiteffizienten Prüfung zugelassen und anschließend bei der Auswertung berücksichtigt wird. Als eine Hauptursache für das vorzeitige Versagen bei starker Erwärmung wurde die statische Druckfestigkeit, welche temperaturabhängig ist, ausgemacht. Steigt die Temperatur, reduziert sich gleichzeitig die Druckfestigkeit. Dies führt bei kraftgesteuerten Druckschwellversuchen mit konstantem Lastspiel zu einer Veränderung des bezogenen Spannungsspiels. Vor allem die stark steigende bezogene Oberspannung führt schlussendlich zu einem vorzeitigen Ermüdungsversagen. Da die Temperatur bei den Versuchen, die vor den rechnerischen Erwartungswerten versagen, stetig bis zum Versagenszeitpunkt ansteigt, ist der Probekörper einer sich über die Versuchsdauer veränderlichen bezogenen Beanspruchung ausgesetzt. Bei der Versuchsauswertung kann ein veränderliches Lastspiel nicht für die Einordnung in Wöhlerdiagramme verwendet werden. Weil die Verwendung der Lasteingangsgrößen zu einer Unterschätzung der Ermüdungsfestigkeit führt, muss eine Ermittlung eines äquivalenten konstanten Spannungsspiels erfolgen, welches die Festigkeitsveränderung des Betons berücksichtigt. Anhand der durchgeführten Druckschwellversuche und der temperaturabhängigen Druckfestigkeit wurde eine analytische Methode entwickelt, mit der unter Verwendung der anfänglichen Lastamplitude sowie der gemessenen maximalen Temperatur eine angepasste Oberspannung berechnet und dann die erreichte Bruchlastwechselzahl in ein Wöhlerdiagramm eingetragen werden kann. Diese Methode wird für den vertieft untersuchten ultrahochfesten Beton für eine Vielzahl von Lastkonfigurationen sowie zusätzlich für Versuchsergebnisse eines hochfesten Betons abschließend verifiziert.

Abstract

Due to ever slimmer and higher load-bearing structures the requirements on building materials are increasing. On the part of concrete, the development is therefore moving towards high-strength and ultra-high-strength concretes. In addition to the increasing static stress, the importance of fatigue strength is also increasing due to increasingly sophisticated constructions. Therefore, the focus in materials research is currently on resistance to cyclic stresses, especially in the area of high-performance concretes. Various researchers have detected a heating of test specimens at higher load-speed during pressure swell tests to generate Wöhler lines. For this reason, this study is focused on the heating in relation to ultra-high-strength concrete.

Using a comprehensive parameter study, an overview of the significant influencing variables on the heating process could be given. On the one hand, an internal friction potential which increases with decreasing maximum grain size and due to growing damage, could be identified as an important cause of temperature generation. On the other hand, the applied energy per load cycle is decisive. Unlike the fatigue strength of concrete, which mainly depends on the maximum stress, the heating per load cycle is dependent on the amplitude. The load frequency only influences the measurable heating by changing the time period available per load change for temperature release. But the heating per load cycle is independent of the load frequency.

A negative influence of the specimen heating could be observed in the significant reduction of the number of cycles to failure compared to tests in which there is no significant increase in temperature. Based on previous studies on high-strength concretes, various authors propose an adaptation of the test procedure to minimise the temperature development in the specimen. The present work proposes a method in which heating is allowed in favour of time-efficient testing and the maximum temperature is taken into account in the results. The static compressive strength, which is temperature-dependent, could be identified as a main cause of premature failure in the case of strong heating. If the temperature increases, the compressive strength is reduced simultaneously. This leads to a change in the related stress cycle in force-controlled pressure swell tests with constant load cycle. The increasing related maximum stress level causes finally a premature fatigue failure. All tests that fail before the calculated expected value heat up until failure. This leads to a permanently changing stress amplitude over the duration of the test. In the evaluation, a changeable load cycle cannot be used for the classification in Wöhler diagrams. Due to the fact that the use of the load input values leads to an underestimation of the fatigue strength, an equivalent constant stress cycle must be determined, which takes into account the strength change of the concrete. Based on the pressure swell tests carried out and the temperature-dependent compressive strength, an analytical method was developed. Using the initial load amplitude as well as the measured maximum temperature, an adjusted maximum stress level can be calculated. The achieved number of cycles to failure can be entered in a Wöhler diagram with the calculated maximum stress level. This method is finally verified for the ultra-high strength concrete investigated in further detail for a wide range of load configurations and additionally for test results of a high-strength concrete.