

DISS. ETH NO. 20611

SUBCRITICAL CRACK GROWTH IN HARDENED CEMENT PASTE

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

WEI CAI

Master of Science, Tampere University of Technology

born 20.10.1982

citizen of China

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Robert J. Flatt	examiner
Prof. Dr. Eugen Brühwiler	co-examiner
Dr. Jan Bisschop	co-examiner

2012

ABSTRACT

Subcritical crack growth (SCG) is an environmentally-assisted slow cracking phenomenon that occurs in (quasi-)brittle materials under static load. Subcritical cracks grow at stress levels much lower than the one required for fast dynamical cracking. This type of cracking is facilitated by some time-dependent effect at the crack tip that weakens the material. SCG can be characterized by the relationship between the stress intensity factor at crack tip and the subcritical crack velocity. The double-torsion (DT) test is commonly used to extract these as well as other SCG parameters from the measured force relaxation of DT-specimens. Understanding SCG is essential for making reliable predictions of the durability of concrete under sustained load.

In this thesis, a novel method has been developed to optically measure SCG in hardened cement paste (with w/c-ratio of 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 and 0.7) by carrying out DT tests inside an Environmental Scanning Electron Microscope or under an optical microscope. Crack tip detection is facilitated by digital image correlation on the time-lapse microscope images. DT-tests at 10% relative humidity (RH) in hardened cement paste showed that optically measured crack velocities were much lower than those calculated from the DT-specimen relaxation. In many experiments the SCG rapidly stopped, due to a lack of moisture in the environment and due to discontinuities in the cementitious matrix. At 90% RH, the force-relaxation in the DT-test was much higher than at 10% relative humidity due to the higher moisture content in the environment. Also at these conditions it was found that only part of the measured relaxation was due to actual crack growth.

The observed discrepancies between the optically measured and calculated velocities at 10 and 90% RH are attributed to creep. Therefore the influence of creep on SCG in hardened cement paste (with w/c-ratio of 0.3, 0.5, 0.6 and 0.7) was investigated. Tests at 10% RH showed that the measured relaxation from DT tests was mainly due to creep. Tests at 90% RH showed that creep and subcritical crack growth both contributed to the measured relaxation. The creep-induced relaxation was separated empirically from the measured relaxation to approximate the SCG-induced relaxation. Subcritical crack indices (i.e. susceptibility to SCG) were obtained based on this approximation, and were found to be higher than those calculated from the measured relaxation and generally consistent with the results from optical measurements. The subcritical crack indices were used as bases for life-time analyses in this study.

Moreover, self-healing of subcritical cracks in hardened cement paste (with w/c-ratio of 0.3 and 0.7) was examined, because it can potentially counteract long-term subcritical cracking. The subcritical cracks can undergo healing through precipitates from the environment or products from continued hydration reactions. For the (partially-)healed materials, the resistance against SCG can be recovered to a certain degree, depending on the specimen properties (i.e. w/c-ratio, degree of hydration) and healing time.

ZUSAMMENFASSUNG

Das subkritische Risswachstum (SKR) ist ein umgebungsbedingtes langsames Rissphänomen, welches in quasi-spröden Materialien unter statischer Last auftritt. Subkritische Risse breiten sich im Gegensatz zur schnellen dynamischen Rissbildung unter viel geringeren Spannungen aus. Dieser Risstyp wird durch einen zeitabhängigen Effekt an der Rissspitze gefördert, welcher das Material schwächt. Die SKR kann durch die Beziehung zwischen dem Spannungsintensitätsfaktor an der Rissspitze und der subkritischen Rissgeschwindigkeit charakterisiert werden. Im Allgemeinen wird der ‘Doppel-Torsionstest (DT)-Tests’ angewendet, um sowohl diesen als auch andere SKR-Parameter der Kraftrelaxationsmessung von DT-Proben zu bestimmen. Das Verständnis der SKR ist essenziell, um zuverlässige Vorhersagen für die Dauerhaftigkeit von Beton unter Langzeitbelastung treffen zu können.

In dieser Doktorarbeit wurde eine neue Methode entwickelt, die es erlaubt, das SKR an Zementstein (mit einem W/Z-Wert von 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 und 0.7) mit Hilfe eines DT-Tests in einem ESEM (Environmental Scanning Electron Mikroscope) oder unter einem Lichtmikroskop visuell zu messen. Die Rissspitzenenerkennung erfolgte durch digitale Bildkorrelation anhand von Zeitrafferbildern. Die DT-Tests an Zementstein zeigten bei 10% relativer Feuchte (RF), dass die optisch gemessenen Rissgeschwindigkeiten viel geringer waren als jene, welche aus der Relaxation der DT-Probe berechnet wurden. Bei vielen Experimenten kam es aufgrund fehlender Feuchte aus der Umgebung und der Diskontinuität der Zementmatrix zu einem schnellen Stoppen der SKR. Unter einer relativen Feuchte von ca. 90% kam es beim DT-Test, bedingt durch den höheren Feuchtegehalt der Umgebung, zu einer viel stärkeren Kraftrelaxation als bei einer

10%iger Feuchte. Auch unter diesen Bedingungen wurde herausgefunden, dass nur ein Teil der gemessenen Relaxation auf dem tatsächlichen Risswachstum beruht.

Die beobachtete Diskrepanz zwischen optisch gemessenen und berechneten Geschwindigkeiten bei 10 und 90% RF sind auf Kriechvorgänge zurückzuführen. Deshalb wurde der Einfluss des Kriechens in Zementstein (mit einem W/Z-Wert von 0.3, 0.5, 0.6 und 0.7) untersucht. Experimente bei 10% RF zeigten, dass die während des DT-Tests gemessene Relaxation hauptsächlich auf das Kriechen zurückzuführen war. Experimente bei 90% RF zeigten, dass sowohl das Kriechen als auch das subkritische Risswachstum gemeinsam zur gemessenen Relaxation beitragen. Die durch das Kriechen induzierte Relaxation wurde empirisch von der gemessenen getrennt, um eine Annäherung an die SKR-induzierte Relaxation zu erzielen. Basierend auf dieser Annäherung konnten subkritische Riss-Indizes (d.h. Anfälligkeit für SKR) gewonnen werden. Diese lagen höher als die von den gemessenen Relaxation berechneten und zeigten generell eine gute Übereinstimmung mit den optischen Messungen. Die subkritischen Riss-Indizes wurden als Grundlage für die Lebensdaueranalysen in der vorliegenden Arbeit verwendet.

Darüber hinaus wurde der Selbstheilungseffekt subkritischer Risse in Zementstein (mit einem W/Z-Wert von 0.3 und 0.7) untersucht, da dieser langfristig dem subkritischen Risswachstum potentiell entgegenwirken kann. Die Risse können aufgrund von Ablagerungen aus der Umgebung oder Hydratationsreaktionen eine sog. Heilung erfahren. Solche (teilweise) geheilten Materialien können ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber dem SKR bis zu einem bestimmten Grad zurückgewinnen, was von den Probeneigenschaften (W/Z-Wert, Hydratationsgrad) und der Heilungsdauer abhängig ist.