

Assessing the autogenous shrinkage cracking propensity of concrete by means of the restrained ring test

Die Bewertung der autogenen Schwindrissneigung von Beton mit Hilfe des
Ring-Tests

Summary and Theses / Kurzfassung und Thesen

zur

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors

der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Sören Eppers

an der

Fakultät Bauingenieurwesen der

Technischen Universität Dresden

Düsseldorf, 29. September 2010

Summary

The autogenous shrinkage due to self-desiccation of high- and ultra-high performance concretes with very low water-cement ratio in case of restraint leads to considerable stresses starting from very early age. The resultant risk of cracking presently cannot be adequately investigated. Parameters that are particularly difficult to capture experimentally are the concrete temperature and the viscoelasticity.

The primary objective of this work was to assess as precise as possible the autogenous shrinkage cracking propensity of representative concretes at strong restraint and constant room temperature. Test methods needed to be chosen and enhanced in a way that preferably allowed for the efficient and precise investigation of all relevant factors in the future. Ideally, a method suitable for a complete empirical modeling was provided.

First the methodological requirements and the advantages and disadvantages of existing test methods were discussed. Based on this, optimized test methods were proposed. Their suitability was verified using the example of ultra-high strength concrete. The choice of concrete compositions considered the essential measures for reducing shrinkage (internal curing, shrinkage-reducing admixtures, reduction of the fraction of Portland cement in the binder).

The autogenous shrinkage was measured with the shrinkage cone method. This new test method was validated by investigations of the repeatability and reproducibility and proved efficient and precise. It allows for measurements under non-isothermal conditions; no established test method exists for that purpose to date. The autogenous shrinkage of the ultra-high strength concretes at the age of 24 h, investigated under quasi-isothermal conditions (20 °C), was between 0,25 mm/m and 0,70 mm/m. It was particularly low when a shrinkage-reducing admixture was added and when superabsorbent polymers were used.

The stresses due to restraint were determined with the restrained ring test. A large part of the stresses to be expected according to Hooke's Law were compensated for by creep and relaxation. The relaxation capacity being very pronounced at very early age was the main reason that no visible cracking occurred, not even with the concretes with high autogenous shrinkage.

The development of the autogenous shrinkage cracking propensity was described as ratio of restraint stress and splitting tensile strength. By means of modified ring tests, used to determine the maximum tensile stress, it could be shown that the ratio of stress to strength is an appropriate failure criterion. However, the cracking propensity can be calculated correctly only if the strongly age-dependent ratio of uniaxial to splitting tensile strength is accounted for. Besides, it needs to be considered that at very early age a plastic stress redistribution may occur in restrained ring tests.

The reference concrete showed a high cracking propensity of up to 0.68. The fact that shrinkage-reducing measures led to significantly lower values reveals their relevance for the safe application of ultra-high strength concrete. However, the investigations carried out here at 20 °C do not allow for a final assessment of the cracking propensity under typical on-site conditions. To empirically model the autogenous shrinkage cracking propensity as a function of temperature and stress level in the future, an analytical stress solution for non-isothermal restrained ring tests and a new approach for investigating the residual stress and relaxation capacity by means of non-passive restrained ring tests was suggested.

Kurzfassung

Das durch Selbstaustrocknung verursachte autogene Schwinden von besonders leistungsfähigen Betonen mit sehr niedrigem Wassermenge-Wert führt bei Dehnungsbehinderung bereits in sehr frühem Alter zu erheblichen Zwangsspannungen. Die Gefahr der Rissbildung, die sich daraus ergibt, lässt sich bislang nur unzureichend untersuchen. Experimentell besonders schwer zu erfassende Faktoren sind die Betontemperatur und die Viskoelastizität.

Das vorrangige Ziel der Arbeit war die möglichst genaue Ermittlung der autogenen Schwindrissneigung repräsentativer Betone bei starker Dehnungsbehinderung und konstanter Raumtemperatur. Dabei waren die Prüfverfahren möglichst so zu wählen und weiterzuentwickeln, dass sich zukünftig alle relevanten Faktoren effizient und genau untersuchen lassen. Im Idealfall sollte eine Methode entstehen, die eine vollständige empirische Modellierung erlaubt.

Zunächst wurden die methodischen Anforderungen und die Vor- und Nachteile existierender Prüfverfahren diskutiert. Darauf aufbauend wurden optimierte Verfahren vorgeschlagen. Ihre Eignung wurde an ultrahochfestem Beton überprüft. Bei der Auswahl der Betone wurden die wesentlichen Maßnahmen zur Schwindreduzierung berücksichtigt (innere Nachbehandlung, schwindreduzierende Zusatzmittel, Verringerung des Portlandzementanteils am Bindemittel).

Das autogene Schwinden wurde mit dem Schwindkegelverfahren gemessen. Das neue Verfahren wurde durch Untersuchungen zur Wiederhol- und Vergleichsgenauigkeit validiert und erwies sich als effizient und genau. Es ermöglicht Messungen unter nicht-isothermen Bedingungen; hierfür existiert bisher kein etabliertes Verfahren. Das autogene Schwinden der untersuchten ultrahochfesten Betone unter quasi-isothermen Bedingungen (20 °C) betrug im Alter von 24 h zwischen 0,25 mm/m und 0,70 mm/m. Besonders gering war es bei Zugabe eines schwindreduzierenden Zusatzmittels bzw. Verwendung superabsorbierender Polymere.

Mit dem Ring-Test wurden die bei Dehnungsbehinderung entstehenden Spannungen ermittelt. Ein großer Teil der gemäß Hooke'schem Gesetz zu erwartenden Spannungen wurde durch Kriechen und Relaxation abgebaut. Die im sehr frühen Alter stark ausgeprägte Relaxationsfähigkeit war der wesentliche Grund dafür, dass es selbst bei Betonen mit hohem autogenem Schwinden zu keiner erkennbaren Rissbildung kam.

Die Entwicklung der autogenen Schwindrissneigung wurde als Verhältnis von Zwangsspannung und Spaltzugfestigkeit beschrieben. Durch modifizierte Ring-Tests, mit deren Hilfe die maximale Zugspannung ermittelt wurde, konnte gezeigt werden, dass das Verhältnis von Spannung und Festigkeit als Versagenskriterium geeignet ist. Die Rissneigung lässt sich aber nur dann korrekt berechnen, wenn das stark altersabhängige Verhältnis von einaxialer Zugfestigkeit und Spaltzugfestigkeit berücksichtigt wird. Außerdem ist zu beachten, dass es im sehr frühen Alter zu einer plastischen Spannungsumlagerung in Ring-Tests kommen kann.

Der Referenzbeton wies eine hohe Rissneigung von bis zu 0,68 auf. Dass die schwindreduzierenden Maßnahmen zu deutlich geringeren Werten führten, zeigt deren Bedeutung für den sicheren Einsatz von ultrahochfestem Beton. Die hier bei 20 °C durchgeführten Untersuchungen erlauben allerdings keine abschließende Bewertung der Rissneigung unter baustellentypischen Bedingungen. Um die autogene Schwindrissneigung zukünftig als Funktion der Temperatur und des Lastniveaus empirisch modellieren zu können, wurden eine analytische Spannungslösung für nicht-isotherme Ring-Tests und ein neuer Ansatz zur Untersuchung der Resttrag- und Relaxationsfähigkeit mit Hilfe nicht-passiver Ring-Tests vorgeschlagen.

Theses

1. The autogenous shrinkage of concretes with very low water-cement ratio if restrained can lead to cracks. The maximum shrinkage cracking propensity may occur at very early age and prior to the maximum rate of heat of hydration. The cracking propensity can be reduced particularly effectively by shrinkage reducing admixtures or superabsorbent polymers.
2. The autogenous shrinkage cracking propensity depends on viscoelasticity and temperature. It is not possible to completely capture these factors experimentally with the methods used so far.
3. A clarification of those issues that are key to the safe application of ultra-high strength concrete is to be expected rather from phenomenological than from micro-analytical approaches.
4. The shrinkage cone method for measuring the autogenous shrinkage is suited to precisely investigate all relevant factors, including the concrete temperature.
5. Temperature-stress testing machines with large specimens are rather not suited for investigating the autogenous shrinkage cracking propensity.
6. The restrained ring test is an efficient and sufficiently precise test method for determining potential restraint stresses due to autogenous shrinkage.
7. The ratio of stress to strength can be used to assess the autogenous shrinkage cracking propensity. The splitting tensile strength is suited to determine the strength also at very early age, however, it needs to be corrected in dependence of the age.
8. The development of tensile strength and modulus of elasticity with time at very early age is not linear. It should be attempted to use sigmoid functions in order to represent the development of these parameters that are essential for the determination and the modeling of the autogenous shrinkage cracking propensity.
9. Temperature changes lead to a thermal stress component in restrained ring tests. The restraint stress measured under non-isothermal conditions in principle can be separated into the thermal and the autogenous shrinkage stress component by means of the proposed analytical solution.
10. The specific increase of stress in restrained ring tests by drying shrinkage or temperature variation is suited to determine the maximum tensile stress and to draw conclusions about the autogenous shrinkage cracking propensity from that.
11. Restrained ring tests in conjunction with a specific stress increase could be an efficient technique for quantifying the residual stress and relaxation capacity. Thus, along with shrinkage cone measurements an empirical modeling could succeed that includes temperature and viscoelasticity. Then the method as a whole would enable a complete solution, at least in phenomenological regard.

Thesen

1. Das autogene Schwinden von Betonen mit sehr niedrigem Wasserzementwert kann bei Dehnungsbehinderung zu Rissen führen. Die maximale Schwindrissneigung kann in sehr frühem Alter und noch vor der maximalen Hydratationswärmerate auftreten. Besonders wirksam kann die Rissneigung durch schwindreduzierende Zusatzmittel oder superabsorbierende Polymere verringert werden.
2. Die autogene Schwindrissneigung hängt von der Viskoelastizität und von der Temperatur ab. Mit den bislang verwendeten Methoden ist eine vollständige experimentelle Erfassung dieser Faktoren nicht möglich.
3. Eine Klärung der für die sichere Anwendung von ultrahochfestem Beton zentralen Fragen ist eher von phänomenologischen als von mikro-analytischen Ansätzen zu erwarten.
4. Mit dem Schwindkegelverfahren zur Messung des autogenen Schwindens lassen sich prinzipiell alle relevanten Faktoren genau untersuchen, auch die Betontemperatur.
5. Temperatur-Spannungs-Prüfmaschinen mit großen Probekörpern sind für die Untersuchung der autogenen Schwindrissneigung eher ungeeignet.
6. Der Ring-Test ist ein effizientes und ausreichend genaues Verfahren zur Ermittlung möglicher Zwangsspannungen infolge autogenen Schwindens.
7. Zur Bewertung der autogenen Schwindrissneigung kann das Verhältnis von Spannung zu Festigkeit verwendet werden. Die Spaltzugfestigkeit ist auch in sehr frühem Alter zur Ermittlung der Festigkeit geeignet, muss aber in Abhängigkeit vom Alter korrigiert werden.
8. Die zeitliche Entwicklung der Zugfestigkeit und des Elastizitätsmoduls in sehr frühem Alter ist nicht linear. Es sollte versucht werden, die Entwicklung dieser für die Bestimmung und Modellierung der autogenen Schwindrissneigung wesentlichen Kennwerte mit sigmoiden Funktionen abzubilden.
9. Temperaturänderungen führen in Ring-Tests zu einer thermischen Spannungskomponente. Mit der vorgeschlagenen analytischen Lösung kann prinzipiell die thermische und die autogene Schwindspannungskomponente einer unter nicht-isothermen Bedingungen gemessenen Zwangsspannung ermittelt werden.
10. Die gezielte Erhöhung der Spannung in Ring-Tests durch Trocknungsschwinden oder Temperaturänderung ist geeignet, um die maximale Zugspannung zu ermitteln und daraus Rückschlüsse auf die autogene Schwindrissneigung zu ziehen.
11. Ring-Tests in Verbindung mit einer gezielten Spannungssteigerung könnten ein effizientes Mittel zur Quantifizierung der Resttrag- und Relaxationsfähigkeit sein. Zusammen mit Schwindkegelmessungen könnte so eine empirische Modellierung gelingen, die Temperatur und Viskoelastizität einschließt. Die vorgeschlagene Gesamtmethode würde damit eine zumindest in phänomenologischer Hinsicht vollständige Lösung ermöglichen.