

17. Nov. 1994

Diss. ETH No. 10754

# DRYING SHRINKAGE AND CRACK FORMATION

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of  
Doctor of Technical Sciences

presented by

ALEJANDRA MÓNICA ALVAREDO  
ingeniera civil, Univ. de Buenos Aires  
born on May 2nd, 1956  
citizen of Argentina

accepted on the recommendation of

Prof. F.H. Wittmann, examiner  
Prof. G. Pijaudier-Cabot, co-examiner  
Prof. E. Anderheggen, co-examiner

  
Prof. Dr. Folker H. Wittmann

## ABSTRACT

In the analysis of concrete structures, no consideration is usually given to the stresses induced by hygral gradients. This might result in a crack pattern which adversely affects the surface layer exposed to the environment, enhancing the penetration of deleterious agents and putting the structure out of service prior to its projected service life. The enforced repair measures are often inappropriate and even damaging due to the insufficient knowledge of the causes of deterioration. The aim of this work is to contribute to a deeper understanding of the formation and propagation of cracks in drying concrete members and, as a consequence thereof, to an improved design of new structures and to an optimized repair of old ones.

The chosen approach is based on developments which belong to the state-of-the-art in the fields of non-linear diffusion and fracture mechanics. The rigorous mathematical description of the material behaviour and the correct numerical solution of the resulting system of equations as well as the precise experimental determination of the required material properties are considered on equal terms. Only those parts of the existing knowledge which are essential for the physically sound prediction of key features of drying shrinkage of concrete have been incorporated into the numerical model.

In Chapter 2 the state-of-the-art in the prediction of time-dependent humidity distributions in concrete is reviewed. The reasons for the choice of the theory of non-linear diffusion with a concentration-dependent diffusion coefficient for the analysis of moisture transport are outlined. The assumed initial and boundary conditions, the numerical solution of the governing equation, and the experimental determination of the moisture-dependent diffusion coefficient are described and discussed.

In Chapter 3 the state-of-the-art in the macro-level modelling of drying shrinkage and in the behaviour of concrete under tensile stresses is summarized. The assumption made on the proportionality between infinitesimal shrinkage and relative humidity change is justified. It is shown that a smeared, fixed-orthogonal, local formulation of the fictitious crack model provides the right framework for the analysis of cracking induced by eigenstresses. The random nature of concrete is taken into consideration by introducing a statistical distribution of some of the material properties. The procedure adopted for the solution of the non-linear system of equations as well as the stability analysis of the drying, elastic-softening body are described.

In Chapter 4 results on the experimental validation of the implemented numerical model are presented. It is shown that characteristic features of shrinkage predicted by the numerical analysis are in good agreement with the experimentally observed response. This refers, for instance, to the influence of the end-face deformation on the measured shrinkage and to the existence of three distinct stages in the evolution of shrinkage with time. With the aim to emphasize the fact that the

observed shrinkage must be actually understood as the response of the drying specimen to a complex state of stress, a sensitivity analysis of the effect of some material parameters on shrinkage is carried out.

In Chapter 5 the developed numerical model is applied to the prediction of the time-dependent warping of concrete ground floors. The most relevant influences (geometry, stiffness of the sub-grade, quality of concrete) on the warping induced by asymmetric drying are systematically studied. It is shown that some of these design variables only exert an influence on the time at which the maximum warping takes place and that others merely activate the competition between opposing mechanisms. As an example on how the efficiency of repair techniques can be evaluated by means of the chosen approach, the application of a coating acting as vapour barrier on the drying surface of the slabs is analysed.

It is concluded that the developed model provides a rational basis for the prediction of shrinkage stresses and shrinkage deformations of drying concrete elements under almost arbitrarily combined hygral and mechanical boundary conditions. Further applications of this approach will contribute to improve the durability and the serviceability of concrete structures exposed to moderate or severe environments.

## ZUSAMMENFASSUNG

In der Spannungsanalyse von Betonbauteilen werden die durch hygri-sche Gradienten hervorgerufenen Eigenspannungen in der Regel nicht berücksichtigt. Dies kann zu Rissbildung vor allem in den der Umgebung ausgesetzten Betonrandzonen führen, die deren Qualität beeinträchtigen, das Eindringen von Schadstoffen begünstigen und dadurch die geplante Lebensdauer des Bauteiles verringern. Die notwendigerweise durchgeführten Reparaturmassnahmen sind als Folge ungenügender Kenntnis der Schadensmechanismen oft nicht ausreichend und häufig sogar nachteilig. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, zu einem tieferen Verständnis der Bildung und des Wachstums von Rissen in trocknenden Bauteilen und damit zu einem besseren Entwurf neuer und einer optimierten Instandsetzung bestehender Bauten beizutragen.

Der gewählte Ansatz basiert auf aktuellen Entwicklungen auf den Gebieten der nichtlinearen Diffusionstheorie und der Bruchmechanik. Die strenge mathematische Beschreibung des Materialverhaltens und die richtige Lösung des resultierenden Gleichungssystems, sowie die genaue experimentelle Bestimmung der benötigten Materialkennwerte werden mit gleicher Wichtigkeit behandelt. Es werden nur diejenigen Kenntnisse, die für die physikalisch sinnvolle Voraussage der Schlüsseigenschaften von Schwinden in trocknendem Beton ausschlaggebend sind, in das numerische Modell miteinbezogen.

Im Kapitel 2 wird eine Übersicht über den Stand des Wissens auf dem Gebiet der numerischen Modellierung von Feuchtetransport in Beton gegeben. Die Gründe für die Wahl der nichtlinearen Diffusionstheorie mit einem konzentrationsabhängigen Diffusionskoeffizienten zur Berechnung der zeitlichen Feuchtigkeitsverteilungen werden umrissen. Die angenommenen Anfangs- und Randbedingungen, sowie die numerische Lösung der Diffusionsgleichung und die experimentelle Bestimmung des feuchtigkeitsabhängigen Diffusionskoeffizienten werden beschrieben und diskutiert.

Im Kapitel 3 wird eine Übersicht über die unterschiedlichen Ansätze auf dem Gebiet der Modellierung des Schwindens und des Verhaltens von Beton unter Zugspannungen gegeben. Die getroffene Annahme bezüglich der Proportionalität zwischen dem infinitesimalen Schwinden und der relativen Luftfeuchtigkeit wird begründet. Es wird gezeigt, dass eine verschmierte, orthogonale, lokale Formulierung des fiktiven Rissmodells eine gute Grundlage zur Berechnung der Rissbildung infolge von Eigenspannungen bildet. Dem Zufallscharakter des Betongefüges wird durch die statistische Verteilung von einigen seiner Materialkennwerte Rechnung getragen. Die gewählte Prozedur zur Lösung des nichtlinearen Gleichungssystems sowie die Stabilitätsanalyse des trocknenden Körpers werden beschrieben.

Im Kapitel 4 werden Ergebnisse über die experimentelle Validierung des aufgebauten numerischen Modells wiedergegeben. Es wird gezeigt, dass wichtige numerisch vorausgesagte Merkmale des Schwindens in guter Übereinstimmung mit dem experimentell beobachteten Verhalten stehen. Dies betrifft, zum Beispiel, den

Einfluss der freien Verformung der Probenränder auf das gemessene Schwinden und die Existenz dreier unterschiedlicher Phasen im zeitlichen Verlauf. Mit dem Ziel, die Tatsache zu unterstreichen, dass das beobachtete Schwinden eigentlich als Antwort des trocknenden Bauteiles auf einen komplexen Spannungszustand betrachtet werden muss, wird eine Sensitivitätsanalyse vom Einfluss einiger Materialparameter auf das Schwinden durchgeführt.

Im Kapitel 5 wird das entwickelte numerische Modell zur Vorhersage der zeitabhängigen Aufschüsselung von Industriefussböden angewendet. Die wichtigsten Einflüsse (Geometrie, Bodensteifigkeit, Betonqualität) auf die durch asymmetrische Austrocknung hervorgerufene Aufschüsselung werden systematisch untersucht. Es wird gezeigt, dass einige dieser Entwurfsvariablen nur die Zeit, bei der die maximale Aufschüsselung auftritt, beeinflussen, nicht aber den maximal erreichten Wert. Die Variation anderer Variablen hat kaum einen Einfluss auf das Verhalten des Bauteils, da sich gegenläufige Effekte fast aufheben. Als Beispiel, wie das Ergebnis einer prophylaktischen oder instandsetzenden Massnahme mit Hilfe des entwickelten Modells realistisch abgeschätzt werden kann, wird die Wirkung einer Beschichtung auf einer trocknenden Oberfläche untersucht.

Das entwickelte Modell liefert eine rationale Basis für die Vorhersage von Schwindspannungen und -verformungen in trocknenden Bauteilen unter fast beliebigen kombinierten hygrischen und mechanischen Randbedingungen. Weitere Anwendungen dieser Methodik werden zu einer Verbesserung der Dauerhaftigkeit und der Gebrauchstauglichkeit von gemässigten und extremen Umgebungen ausgesetzten Betonbauteilen beitragen.