

**Inverse Analyse zur Ermittlung der bruchmechanischen
Eigenschaften entfestigender und verfestigender
zementgebundener Werkstoffe**

**Inverse Analysis for Determining Fracture Properties of Softening and
Hardening Cement-Based Materials**

An der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) eingereichte

DISSERTATION

**vorgelegt von
M.Sc. Nick Bretschneider**

eingereicht am 4. Oktober 2010

Gutachter:
Prof. Dr.-Ing. V. Mechtcherine
Prof. Dr.-Ing. V. Slowik

Kurzfassung

Für den Fall der einachsigen Zugbeanspruchung erlauben zentrische Zugversuche eine direkte experimentelle Bestimmung der bruchmechanischen Materialeigenschaften. Aus den Ergebnissen von Keilspalt- und Biegezugversuchen können diese Eigenschaften dagegen nur auf indirektem Wege mittels inverser Analyse der Experimente ermittelt werden. Allerdings bieten die letztgenannten Versuche den Vorteil eines einfachen experimentellen Aufbaus.

Die inverse Analyse beinhaltet die numerische Simulation des auszuwertenden Experimentes unter Vorgabe eines Parametersatzes für die Materialeigenschaften, die Bewertung der Simulationsergebnisse durch Vergleich mit den experimentellen Beobachtungen und eine darauffolgende Optimierung des Parametersatzes. Durch ein wiederholtes Durchlaufen dieser Prozedur wird das numerische an das experimentelle Ergebnis angepasst, was schließlich die Identifikation der gesuchten Materialparameter erlaubt.

Es wird ein Verfahren der inversen Analyse bruchmechanischer Experimente vorgeschlagen, welches für die hier vorliegende Problemstellung Vorteile gegenüber bereits bekannten Verfahren aufweist und sowohl für entfestigende als auch für verfestigende zementgebundene Werkstoffe anwendbar ist. Zur Optimierung des Parametersatzes findet dabei ein evolutionärer Algorithmus Anwendung. Die wichtigsten Vorteile des gewählten Optimierungsalgorithmus bestehen in seiner Robustheit gegenüber dem Auftreten lokaler Minima in der Fehlerfunktion und in der Objektivität gegenüber vom Nutzer gewählten Startparametern. Ein Nachteil der Optimierung mittels evolutionärer Algorithmen ist die große Anzahl der erforderlichen numerischen Simulationen des auszuwertenden Experimentes. Dies hatte zur Folge, dass vereinfachende und an den jeweiligen Werkstofftyp angepasste mechanische Modelle zur Simulation der Experimente entwickelt und genutzt werden mussten. Derartige Modelle kamen in inversen Analysen zur Bestimmung bruchmechanischer Eigenschaften sowohl von entfestigenden als auch von verfestigenden Werkstoffen zur Anwendung. Bei einigen modernen Verbundwerkstoffen auf Zementbasis erfordert die Zuordnung zu einem der beiden genannten Werkstofftypen aufwendige Experimente oder die Anwendung eines dafür geeigneten Verfahrens der inversen Analyse.

Mittels des vorgeschlagenen Verfahrens der inversen Analyse wurde zunächst der Randeffect auf die lokalen bruchmechanischen Eigenschaften in Proben aus Normalbeton untersucht. Es erfolgten Keilspaltzugversuche an verschiedenen großen Probekörpern. Inverse Analysen dieser Experimente führten zur Entwicklung eines Modells für die Veränderung der lokalen Entfestigungseigenschaften entlang des Risspfades. Die Anwendung dieses Modells erlaubt die Erklärung des Probengrößeneffektes auf die bruchmechanischen Materialeigenschaften sowie die Bestimmung einer probengrößenunabhängigen Entfestigungskurve.

Für die Bestimmung bruchmechanischer Eigenschaften von verfestigenden Werkstoffen wurde eine zweistufige Variante des vorgeschlagenen Verfahrens der inversen Analyse entwickelt, die Biegezugversuche an ungekerbten Proben zur Ermittlung der Verfestigungseigenschaften und Biegezugversuche an gekerbten Proben zur Ermittlung der Entfestigungseigenschaften vorsieht. Eine Validierung des Verfahrens erfolgte für drei verschiedene verfestigende Werkstoffe – für zwei hochduktilen Betone (strain hardening cement-based composites) sowie für einen hochfesten Stahlfasermörtel – durch den Vergleich der Ergebnisse mit denen von zentrischen Zugversuchen. Das entwickelte Verfahren erlaubt die Klassifizierung zementgebundener Werkstoffe als entfestigend, biegezugverfestigend oder verfestigend und die Ermittlung von entsprechenden stoffgesetzlichen Beziehungen anhand der Ergebnisse indirekter Zugversuche.

Abstract

Uniaxial tension tests, also referred to as direct tension tests, allow a direct experimental determination of fracture mechanics material properties for the case of pure tension. On the basis of the experimental results from wedge splitting or bending tests, these properties may only be determined in an indirect way by means of inverse analysis of the experiments. However, the latter tests offer the advantage of a comparably simple experimental setup.

The inverse analysis comprises the numerical simulation of the respective experiment with an assumed parameter set of material properties, the evaluation of the simulation results by comparison with the experimental observations, and the subsequent optimization of the parameter set. By repeatedly going through this procedure, the numerical results are fitted to the experimental ones, finally allowing the identification of the material parameters to be determined.

A method for the inverse analysis of fracture tests is proposed which, for the present problem, has advantages over previously known methods, and which may be applied to softening as well as hardening cement-based materials. For the parameter optimization, an evolutionary algorithm is used. Its main advantages are the robustness to the appearance of local minima in the error function, and the objectivity of the results with respect to the user-selected start parameters. A disadvantage of the optimization by using an evolutionary algorithm is the large number of required numerical simulations of the respective experiment. Therefore, simplifying mechanical models for the investigated material types had to be developed. Such models were used in inverse analyses for determining the fracture properties of both softening and hardening materials. For some modern cement-based composite materials, the allocation to one of the aforementioned material types requires extensive experiments or the application of a suitable inverse analysis method.

Using the proposed method, the boundary effect on the local fracture properties in specimens made of normal concrete was investigated. Wedge splitting tests were carried out, and inverse analyses of these experiments led to the development of a model for the variation of the local softening curve along the crack path. The application of this model allows the explanation of the size effect on fracture mechanics material properties and the determination of a size-independent softening curve.

For determining the fracture properties of hardening materials, a two-stage version of the proposed inverse analysis method has been developed. It requires the results of bending tests at unnotched beams for characterizing the hardening behavior and at notched beams for characterizing the softening behavior. A validation of the method was performed for three different hardening materials, namely, for two strain hardening cement-based composites as well as for a high-strength steel fiber-reinforced mortar, by comparing the results with those of direct tension tests. The developed method allows the classification of cement-based materials as softening, hardening or hardening under bending, respectively, and the identification of constitutive relations based on the results of indirect tension tests.

Thesen

1. Zur Beurteilung der Sicherheit und Dauerhaftigkeit von Bauwerken aus zementgebundenen Werkstoffen ist die Kenntnis der bruchmechanischen Materialeigenschaften erforderlich.
2. Für den Fall der einachsigen Zugbeanspruchung können die bruchmechanischen Eigenschaften zementgebundener Werkstoffe in zentrischen Zugversuchen bestimmt werden. Eine Alternative zu diesen vergleichsweise aufwendigen Experimenten stellen Biegezug- und Keilspaltzugversuche dar. Ihr wesentlicher Nachteil ist jedoch, dass die gesuchten Materialparameter nur durch eine sogenannte inverse Analyse der Experimente zu bestimmen sind.
3. Bei Verwendung eines wirklichkeitsnahen mechanischen Modells sowie eines geeigneten Optimierungsverfahrens ist die Bestimmung der bruchmechanischen Eigenschaften mittels inverser Analyse sowohl für ent- als auch für verfestigende zementgebundene Werkstoffe möglich.
4. Evolutionäre Algorithmen als Optimierungsverfahren in inversen Analysen bieten die Vorteile der Robustheit gegenüber lokalen Minima in der Fehlerfunktion und der Objektivität gegenüber den gewählten Startparametern. Außerdem ist die Optimierung von der Formulierung des physikalischen Problems getrennt, was Änderungen am verwendeten mechanischen Modell vereinfacht. Nachteilig ist die benötigte vergleichsweise große Anzahl an numerischen Simulationen des betreffenden Experimentes.
5. Die effektive Anwendung evolutionärer Algorithmen für die inverse Analyse bruchmechanischer Experimente erfordert die Nutzung speziell angepasster mechanischer Modelle. Dadurch kann die benötigte Rechenzeit reduziert werden.
6. Bruchmechanische Eigenschaften von entfestigenden zementgebundenen Werkstoffen unterliegen einem Probekörpergrößeneffekt. Deshalb ergibt die Auswertung von Experimenten mit verschiedenen Probekörpergrößen unterschiedliche Entfestigungskurven. Diese Unterschiede lassen sich durch einen Randeinfluss auf die lokalen bruchmechanischen Eigenschaften entlang des Risspfades erklären.
7. Unter Anwendung eines Modells, das die Änderung der lokalen bruchmechanischen Eigenschaften entlang des Risspfades beschreibt, kann mittels inverser Analysen von Laborexperimenten eine probengrößenunabhängige Entfestigungskurve bestimmt werden.
8. Für verfestigende zementgebundene Werkstoffe lassen sich mittels eines vereinfachenden mechanischen Modells durch inverse Analyse von Versuchen an ungekerbten Vierpunktbiegebalken die Verfestigungseigenschaften ermitteln. Die zugehörigen Entfestigungseigenschaften können durch inverse Analyse von Biegeversuchen an gekerbten Probekörpern bestimmt werden.

Theses

1. In order to assess the safety and durability of structures made of cement-based materials, knowledge of the fracture mechanics material properties is required.
2. For the case of uniaxial tension, the fracture mechanics properties of cement-based materials may be determined in direct tension tests. An alternative to these comparably extensive experiments provide bending and wedge splitting tests. Their main disadvantage is, however, that the aforementioned material properties may only be determined by inverse analysis of the experiments.
3. When using an appropriate mechanical model and a suitable optimization method, it is possible to determine the fracture properties by inverse analysis for both softening and hardening cement-based materials.
4. Evolutionary algorithms as optimization methods in inverse analyses offer the advantages of robustness to local minima in the error function and of objectivity with respect to the selected start parameters. In addition, the optimization method is separated from the formulation of the physical problem, which simplifies modifications of the selected mechanical model. A disadvantage is the comparably large number of individual numerical simulations of the experiment that are required.
5. The effective application of evolutionary algorithms for the inverse analysis of fracture tests requires the utilization of specially adapted mechanical models. In this way, the computing time may be reduced.
6. Fracture mechanics material properties of softening cement-based materials exhibit a specimen size effect. Therefore, the evaluation of experiments with different specimen sizes results in different softening curves. These differences may be explained by a boundary effect on the local fracture properties along the crack path.
7. Using a model for the variation of the local fracture properties along the crack path, size-independent softening curves may be determined by inverse analyses of laboratory experiments.
8. For hardening cement-based materials, a simplified mechanical model used in the inverse analysis of four-point bending tests at unnotched specimens allows to determine the hardening properties. The softening properties of such materials may be determined by the inverse analysis of bending tests at notched specimens.