

Aurel Qinami

A Variational Eigenfracture Approach on Modelling Structural Failure of Reinforced Concrete



Institute for
Structural Analysis

Summary

Concrete is the most important material in construction industry. The optimal design of structures with this material requires a profound understanding of its response at arbitrary loading conditions. The heterogeneity of concrete and its asymmetric behavior at tension and compression make this task even more challenging. Clearly, to achieve this, the straightforward and most accurate approach is to perform experimental tests but they are usually expensive and time consuming. An alternative approach is to perform numerical simulations. They pose no limits with respect to the type of tests, loading conditions or size of structures within available computational power. In the framework of solid and fracture mechanics, the thesis at hand is focused on introducing a nonlinear rate dependent constitutive behavior for concrete and a variational eigenfracture scheme to model cracks in a Finite Element Method (FEM) setting.

Initially, to account for high loading rates, a material model that distinguishes between tension and compression is introduced in a rate dependent plasticity formulation. Using the microplane framework at the material point level to describe the concrete constitutive behavior results in an induced anisotropy due to the independent evolution of internal variables at the microplane level. Moreover, in case of reinforced structures, the bond between concrete and reinforcement is modelled via an interface element formulation that is able to additionally consider the effects of ribs in steel bars.

While the implemented plasticity formulation is adequate to simulate the initial loss of stiffness, fracture is used to model the post-peak response. The three main mechanisms that describe a crack, namely, initiation, direction and irreversibility, are captured by the variational eigenfracture scheme, introduced here for both elasticity and plasticity. Regularizing the approach by introducing an element neighborhood which accurately computes the attendant fracture energy, yields a robust mesh independent method to model cracks by an element erosion technique.

The introduced developments are validated in a series of representative numerical examples adapted from literature and experimental tests. By the achieved results, it can be concluded that the eigenfracture scheme coupled to the rate dependent plasticity model provides a powerful numerical tool to investigate concrete structures.

The developed methods and algorithms are coded into the finite element software FEAP (Finite Element Analysis Program) which is based in the Fortran programming language version FORTRAN77.

Zusammenfassung

Beton zählt zu den bedeutendsten Materialien der Bauindustrie. Die optimale Gestaltung und Bemessung von Tragstrukturen aus Beton erfordert ein tiefgreifendes Verständnis des Materialverhaltens unter beliebigen Belastungsbedingungen. Insbesondere die ausgeprägte Heterogenität sowie das asymmetrische Verhalten unter Zug- und Druckbeanspruchungen stellen hierbei eine große Herausforderung dar. Der direkteste und genaueste Ansatz zur Charakterisierung des Materialverhaltens liegt in der Durchführung experimenteller Versuche, welche jedoch meist teuer und zeitaufwändig sind. Ein alternativer Ansatz besteht darin, numerische Simulationen durchzuführen, die für eine bestimmte Rechenleistung keine Grenzen hinsichtlich der Art des Versuchs, der Belastungsbedingungen oder der Größe der Struktur besitzen. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich im Rahmen der Festkörper- und Bruchmechanik auf die Einführung einer nichtlinearen und geschwindigkeitsabhängigen konstitutiven Beschreibung für Beton, sowie eines auf dem Variationsprinzip basierenden *eigenerosion* Schemas zur Modellierung von Rissen im Kontext der Finite-Elemente-Methode (FEM).

Zunächst wird zur Berücksichtigung hoher Belastungsgeschwindigkeiten ein Materialmodell eingeführt, welches zwischen Zug- und Druckbeanspruchung unterscheidet und auf einer ratenabhängigen Plastizitätsformulierung basiert. Die Verwendung des *Microplane*-Ansatzes zur Beschreibung des konstitutiven Verhaltens von Beton auf Materialpunktebene führt, durch die unabhängige Entwicklung der internen Variablen auf den einzelnen *Microplanes*, zu einer induzierten Anisotropie. Im Fall verstärkter Betonstrukturen wird zudem der Verbund zwischen Beton und Bewehrung mittels einer Formulierung für *Interface*-Elemente modelliert, welche den Einfluss der Rippen des Bewehrungsstahls abbildet.

Während die implementierte Plastizitätsformulierung zweckmäßig ist, um den initialen Verlust der Steifigkeit nachzubilden, dient die Bruchformulierung der Modellierung des Nachbruchverhaltens. Die drei Hauptmechanismen, die einen Riss wesentlich beschreiben (Initiierung, Richtung und Irreversibilität), werden aus dem hier eingeführten variationellen *eigenfracture* Schema sowohl für die Elastizität als auch für die Plastizität erfasst. Regularisiert wird der Ansatz durch die Einführung einer Elementumgebung in welcher die zugehörige Bruchenergie berechnet wird. Das *eigenerosion* Schema stellt eine robuste netzunabhängige Methode zur Modellierung von Rissen dar.

Die vorgestellten Entwicklungen werden durch eine Auswahl repräsentativer numerischer Beispiele aus der Literatur und durch experimentelle Daten validiert. Aus den erzielten Ergebnissen kann geschlossen werden, dass die *eigenfracture* Methode in Verbindung mit einem ratenabhängigen Plastizitätsmodell ein leistungsfähiges numerisches Werkzeug zur numerischen Untersuchung von Betonstrukturen darstellt.

Die entwickelten Methoden und Algorithmen wurden in die finite Elemente Software FEAP (Finite Element Analysis Program) in der Programmiersprache Fortran (FORTRAN77) implementiert.