

Kaan Özenç

Approaches to model failure of structures by configurational mechanics

Theory and numerics

Summary

The present work is related to further developments of numerical simulation methods of fracture and failure mechanisms within the finite element framework by using a criterion based on configurational mechanics. Investigations of fracture processes became possible by combining discrete fracturing and configurational mechanics based criteria by the introduction of a discontinuity that represents the crack through a node duplication method. Although the configurational mechanics based approach has been successfully carried out in previous studies, the application of the approach in combination with a discrete crack propagation scheme has been mainly confined to the elastic material response. The main aims of this contribution are to develop a theoretical and computational approach for the description of various aspects of solid mechanics, based on the energy minimization principles for continua and to implement a useful algorithm for discrete fracturing problems for a wide range of material descriptions.

The presentation of the thesis is twofold. The first part is dedicated to the description of the fundamentals of continuum mechanics, configurational mechanics and general theories of fracture mechanics which introduce the theoretical basis for further developments in this study. After the fundamentals of continuum mechanics are given, the approaches based on a LAGRANGIAN density and HAMILTON's principle are introduced in this part of the thesis in order to describe the momentum balance equation in the configurational space. The study on HAMILTON's theory focuses on a general inelastic response of the solid, which is based on energetic arguments with inertia effects. Furthermore, a review of pioneering publications with the main focus on related formulations and applications for fracture mechanics is given. This part also covers an overview of the developments of the J-integral approach to different material models, as the concept of the J-Integral is indeed directly related to configurational mechanics. In addition, from the presentation of early implementations up to recent developments of the traditional integration methods, the historical evolution of the methods is outlined. As well, the configurational mechanics concept is discussed by using the introduction of material and physical spaces. Finally, derivations of the energy momentum tensors from the covariant pull-back of the spatial balance equation for global inelasticity, plasticity and viscoelasticity are introduced for a media at finite strain in the first part of the thesis.

The further developments achieved by the author is discussed in the second part of the thesis. Since the proposed methods are used for various purposes within different approaches to fracture analysis such as linear and non-linear elastic fracture, elastodynamic fracture, elasto-plastic fracture, as well as visco-elastic fracture mechanics, it is necessary to introduce the fundamentals of these approaches where geometric non-linearity is taken into consideration. First, for the linear elastic fracture theory, the previous r-adaptive algorithms are restricted and based only on the explicit description of the energy minimization theory. In this thesis, an implicit algorithm

based on the Principle Local Symmetry (PLS) theory is introduced, which is implemented by using an additional NEWTON-RAPHSON scheme. With the previous explicit approaches, it is not possible to study the bifurcation phenomenon, which is a common phenomenon observed in dynamic crack propagation and still remains an open issue. Therefore, in case of elastodynamic fracture, a crack velocity based criterion is introduced and it is shown that the new algorithm, based on the implicit description of the energy minimization theory, is capable of capturing the physics behind the branching phenomenon. Secondly, for the dissipative material behaviour the modelling of elastic-plastic fracturing is considered. Although a condensed study of the approach in plasticity already exists in literature, for the material force approach, mesh sensitivity of the method is here addressed where gradient terms are required to be calculated by a projection method. For the application of the method, the results are validated by comparing the results for different benchmark studies, such as the modified boundary layer problem, the compact tension specimen and the single-edge cracked tension specimen. Moreover, the initial strain loads and thermal coupling of the plasticity theory are studied. After elastic-plastic fracturing is discussed, a visco-elastic fracturing model for elastomers is introduced. In general, elastomers exhibit very complicated and time-dependent inelastic behaviour at finite strain with non-linear elasticity and significant energy dissipation due to the viscoelastic phenomena. Here, the main aim is to evaluate the fracture criteria and then to establish the node duplication model which ensures the non-linear solution process. For the application of the method to elastomers, the simulation of different specimens is compared to experimental data, which are available in the literature.

To sum up, the present work gives a comprehensive overview of the theory and highlights the capabilities of the proposed model for continua with different constitutive models. Moreover, the applicability of the proposed method is evaluated for numerical examples which cover a wide range of geometries and behaviour. Moreover, useful enhancements and extensions to the general implementation of the theory are introduced with a current r-adaptive algorithm and presented in terms of relevant numerical applications to structures with complex material behaviour.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Weiterentwicklung von numerischen Simulationsmethoden für Bruch- und Versagensmechanismen im Rahmen der Methode finiter Elemente durch die Anwendung konfigurationsmechanischer Bruchkriterien. Die Kombination diskreter Rissbeschreibungen und Bruchkriterien auf der Basis der materiellen Kräfte ermöglicht die Untersuchung von Bruchvorgängen. Dabei wird die rissabbildende Diskontinuität durch die Anwendung der Knotenduplikationsmethode umgesetzt. Obwohl die Anwendung der materiellen Kräfte bereits erfolgreich eingesetzt wurde, beschränken sich vorhandene Studien hauptsächlich auf eine elastische Materialantwort. Die Hauptziele dieser Arbeit sind die Entwicklung von Ansätzen zur Beschreibung zahlreicher Aspekte der geometrisch linearen und nichtlinearen Festkörpermechanik. Dabei werden theoretische Grundlagen der Kontinuumsmechanik auf Strukturebene erweitert. Basierend auf Energieminimierungsprinzipien und den daraus resultierenden finiten Elementformulierungen, wird die Betrachtung und Auswertung großer Deformationen ermöglicht. Die theoretischen Erweiterungen beinhalten weiterhin die Berücksichtigung nichtlinearer konstitutiver Materialgesetze. Generalisierte numerische Methoden und Algorithmen zur Simulation diskreter Rissprobleme im Rahmen von Strukturanalysen werden ebenso bereitgestellt.

Die vorliegende Arbeit besteht aus zwei Teilen. Der erste Teil widmet sich den Grundlagen der Kontinuumsmechanik, den materiellen Kräften sowie der Bruchmechanik als theoretische Grundlage für die in dieser Studie entwickelten Methoden. Nach der Einführung kontinuumsmechanischer Grundlagen wird die Impulsbilanz im materiellen Raum auf der Basis des HAMILTON-Prinzips unter Verwendung einer LAGRANGE-Dichte hergeleitet. Das HAMILTON-Prinzip basiert auf der energetischen Berücksichtigung von Trägheitseffekten und wird hinsichtlich allgemeiner inelastischer Festkörperantworten formuliert. Desweiteren beinhaltet der erste Teil einen Überblick über die bahnbrechenden Veröffentlichungen zu entsprechenden Formulierungen und Anwendungen in der Bruchmechanik. Dies schließt einen Überblick über die Entwicklung des Zugangs über ein J-Integral für unterschiedliche Materialmodelle ein, da das Konzept des J-Integrals direkt mit der materiellen Mechanik verknüpft ist. Zusätzlich wird die geschichtliche Entwicklung der Methoden, beginnend bei frühen Implementierungen bis hin zu aktuellen Weiterentwicklungen traditioneller Integrationsmethoden, dargestellt. Desweiteren wird das Konzept des materiellen Raums durch die Unterscheidung von materiellem und physikalischem Raum diskutiert. Darüber hinaus enthält der erste Teil der Arbeit die Herleitung des Energiebilanzensors für globale Inelastizität, Plastizität und Viskoelastizität durch einen kovarianten Pull-back der räumlichen Gleichgewichtsbedingung.

Der zweite Teil dieser Arbeit ist den Entwicklungen der vorliegenden Studie gewidmet. Da die vorgestellten Methoden für zahlreiche Zwecke in unterschiedlichen Ansätzen zur Analyse bruchmechanischer Vorgänge, wie dem linear und nichtlinear-elastischen Bruch, dem elasto-dynamischen Bruch, dem elasto-plastischen Bruch sowie dem visko-

elastischen Bruch angewendet werden, ist es notwendig, die Grundlagen der Ansätze unter Berücksichtigung von geometrischen Nichtlinearitäten zu formulieren. Zunächst, im Rahmen der linear-elastischen Bruchtheorie, ist der r-adaptive Algorithmus einzig auf die explizite Beschreibung der Energieminimierungstheorie beschränkt. In dieser Arbeit wird ein impliziter Algorithmus auf der Basis des Prinzips der lokalen Symmetrie (PLS) eingeführt und unter Verwendung eines zusätzlichen NEWTON-RAPHSON-Verfahren implementiert. Mit den expliziten Ansätzen ist die Erfassung des Verzweigungsphänomens, welches in dynamischen Bruchvorgängen von Bedeutung ist, nicht möglich. Daher wird im Fall des elasto-dynamischen Bruchs ein Kriterium in Abhängigkeit der Rissspitzengeschwindigkeit eingeführt und gezeigt, dass der neue Algorithmus auf der Basis der impliziten Beschreibung der Energieminimierungstheorie in der Lage ist, die physikalischen Vorgänge des Verzweigungsphänomens zu beschreiben.

Bei dissipativem Materialverhalten wird zunächst der elasto-plastische Bruch betrachtet. Ungeachtet der Tatsache, dass hierfür bereits Studien in der Literatur zusammengefasst sind, wird in dieser Arbeit die Netzabhängigkeit der Methode für den Fall, dass Gradiententerme berechnet werden müssen, untersucht. Für die Anwendung der Methode, erfolgt eine Validierung der Simulationsergebnisse mit mehreren experimentellen Daten aus der Prüfung von kompakten oder einseitig gerissenen Zugproben. Darüber hinaus werden Lasten aus initialer Dehnung sowie thermischer Kopplung mit Plastizität untersucht. Im letzten Teil der Arbeit wird der visko-elastische Bruch von Elastomeren untersucht. Elastomere unterliegen im Allgemeinen komplizierten und zeitabhängigen Materialverhalten bei großen Verzerrungen. Nichtlineare Elastizität sowie erhebliche Energiedissipation aufgrund viskoelastischer Phänomene sind meßbare Kennzeichen davon. Primäre Ziele sind die Auswertung von Risskriterien sowie die Festlegung von Knotenduplikationsmodellen, um den nichtlinearen Lösungsprozess sicherzustellen. Zur Anwendung der Methode auf Elastomere werden unterschiedliche Probekörper mit Serien von Experimentdaten, die in der Literatur vorhanden sind, verglichen. Zusammengefasst gibt diese Arbeit eine abgeschlossene und umfassende Darstellung der Theorie sowie weiterreichende Möglichkeiten für Kontinua mit zahlreichen konstitutiven Materialmodellen. Auf den in der Studie dargestellten Aspekten der Formulierung aufbauend wird die Methode hinsichtlich einer Vielzahl von Versagensanwendungen durch eine netzobjektive Methode ausgewertet. Desweiteren werden nützliche Verbesserungen und Erweiterungen der allgemeinen Implementation der Theorie mit einem neuen r-adaptiven Algorithmus eingeführt und durch entsprechende numerische Anwendungen auf Strukturen mit komplexem Materialverhalten vorgestellt.