

Phase-field Fracture Description on Elastic and Inelastic Materials at Finite Strains

Submitted to
the Faculty of Civil Engineering at Technischen Universität Dresden

Dissertation

to obtain an academic degree

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

submitted by

M.Sc. **Bo Yin**

born on 28.08.1990 in Sichuan, China

on 06.12.2021

Supervisors:

Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske

Prof. Dr. Laura De Lorenzis

Prof. Dr.-Ing. habil. Ralf Müller

Summary

The aim of the dissertation at hand is to use phase-field modeling to simulate fracture evolution considering various constitutive properties. It firstly presents a brief introduction of the continuum mechanical basis for the subsequent derivations. Then, the smeared phase-field theory is presented by considering the classical GALERKIN-type weak form and is subsequently implemented into the Finite Element Method for numerical realization. In the sequel, a standard phase-field approach is extended to different models accounting for, e.g. quasi-brittle fracture, ductile fracture, anisotropic fracture as well as rate dependent fracture.

Quasi-brittle fracture in polymeric materials is studied, which considers fracture occurring at large deformation. Then, a novel ductile fracture model is proposed by redefining the fracture toughness depending on the accumulated plastic strain, which successfully predicts the results comparing to experimental investigations. Meanwhile, the numerical convergence of the classical staggered scheme of the decoupled solution is examined, which provides numerical reliability. In the sequel, the anisotropic phase-field modeling accounts for the mechanical strengths and fracture resistances of both matrix and fiber materials simultaneously, ending up with an conceptual equivalent phase-field fracture surface density function. It effectively addresses the issue of the phase-field profile depending on the scaling factor. Furthermore, rate dependent fracture is discussed from two aspects, namely, rate dependent fracture toughness and rate dependent material characteristics. The former one yields a non-linear phase-field evolution according to a consistent derivation. The numerical simulation successfully captures the development of the crack propagation velocity investigated by experimental findings. The latter one considers finite viscoelasticity coupled with a standard phase-field model. The comparative study of the presented model against other numerical models and experimental validations shows remarkable agreement.

Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Dissertation ist die numerische Simulation von Risswachstumsprozessen mithilfe der Phasenfeldmethode unter Berücksichtigung von verschiedenen Materialeigenschaften. Zunächst werden die Grundlagen der Kontinuumsmechanik eingeführt soweit sie für die späteren Herleitungen benötigt werden. Anschliessend wird die verschmierte Modellierung von Rissen mittels Phasenfeld präsentiert und in die schwache Formulierung nach GALERKIN überführt um schliesslich die Realisierung im Rahmen der Finiten Elemente Methode zu erhalten. Die so hergeleitete klassische Phasenfeldmethode für spröde Bruchvorgänge bildet die Grundlage für die sich anschliessenden Erweiterungen der Formulierung hinsichtlich quasi-sprödem und duktilem Bruch, anisotropen sowie ratenabhängigen Bruchvorgängen.

Quasi-sprödes Versagen von Polymeren wird unter Berücksichtigung von grossen Deformationen untersucht. Eine neue Formulierung für duktile Werkstoffe zeigt gute Übereinstimmungen mit experimentellen Untersuchungen, wobei die Abhängigkeit der Bruchenergie von der akkumulierten plastischen Dehnung berücksichtigt wird. Es werden Konvergenzuntersuchungen für den gestaffelten Lösungsprozess gezeigt, die die korrekte numerische Implementierung belegen. Die entwickelte anisotrope Phasenfeldformulierung basiert auf der Festigkeit des Matrixmaterials und der eingebetteten Fasern. Auf diese Weise kann eine äquivalente Bruchenergiedichtefunktion für das Phasenfeldmodell erhalten werden. Dabei wird ausserdem die auf das Problem eingegangen, dass das Phasenfeldprofil vom Längenskalenparameter abhängt. Die ratenabhängige Phasenformulierung berücksichtigt sowohl die Ratenabhängigkeit der Bruchenergie als auch die Ratenabhängigkeit der Materialeigenschaften. Allerdings führt die ratenabhängige Bruchenergie zu einer nichtlinearen Entwicklungsgleichung für das Phasenfeld. Die numerisch berechnete Rissspitzengeschwindigkeit stimmt gut mit experimentellen Ergebnissen überein. Für die materielle Ratenabhängigkeit wurden Beispiele mit finiter Viskoelastizität untersucht und ebenfalls sehr gute Übereinstimmungen mit experimentellen Ergebnissen erzielt.