

Regularized damage and plasticity microplane models for concrete

Regularisierte Schädigung und Plastizität Microplane Modelle für Beton

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
eingereichte

Dissertation

von
M.Sc. Imadeddin Zreid
geboren am 23. September 1985 in Gaza

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Technische Universität Dresden
o. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Günter Hofstetter
Universität Innsbruck
Prof. Ing. Milan. Jirásek DrSc.
Czech Technical University in Prague

Tag der Einreichung: 2. Juli 2018

Tag der Verteidigung: 13. November 2018

Summary

Nonlinear finite element simulations provide valuable insights for the analysis and design of concrete structures, which enable the assessment of the failure patterns as well as the deterioration of the material stiffness at different levels of loading. The response of concrete encompasses a wide range of variations in different stress states due to its complex heterogeneous nature. Moreover, strain softening and localization involved in concrete constitutive laws lead to higher computational requirements in the post-elastic regime and require regularization techniques to ensure convergence and mesh objectivity. The thesis at hand aims to contribute to the development of reliable computational models for concrete. Adopting the microplane theory, three implicit gradient models will be formulated: damage, plasticity and coupled damage-plasticity. The pure damage and pure plasticity models provide simplified approaches to describe concrete under monotonic loading, while the coupled model offers the capability to simulate concrete under general cyclic triaxial loading.

Plasticity models deal with the description of permanent deformations induced by the microstructural movement along slip planes while the material integrity is not affected. By contrast, damage models deal with the loss of material integrity caused by the initiation and propagation of microcracks. Concrete response typically follows a combination of these two processes and, thus, a generalized framework for concrete should couple plasticity and damage. All models in this thesis are formulated within the microplane theory, which differs from standard continuum mechanics models in the assumption that the constitutive laws are defined between stress and strain vectors on a randomly oriented plane. This simplifies the material laws and results in an induced anisotropy automatically.

Regularization by the implicit gradient approach ensures numerical stability and mesh independence of the models. It is well known that strain softening and localized deformations cannot be incorporated in local continuum mechanics models. The implicit gradient enhancement is a robust form of nonlocal and higher order continuum theories, where the nonlocal interaction in the material is achieved by defining new degrees of freedom governed by extra partial differential equations. The formulation and implementation of the proposed approaches in a 3D implicit finite element code are discussed in details. The tangent and return mapping algorithms are provided to facilitate the reproduction of the results.

Experimental strategies to identify the parameters of the coupled model are proposed. Finally, the developed approaches are utilized to simulate a variety of experimental data. Examples of plain and reinforced concrete are carried out and comparisons to the experiments are provided to illustrate the capabilities of the models. The mesh objectivity and the quadratic convergence are also checked for the different models by comparing the results achieved by different mesh refinements.

Kurzfassung

Nichtlineare Finite-Elemente-Simulationen bieten wertvolle Einsichten für die Analyse und Bemessung von Betonstrukturen, die sowohl die Beurteilung der Versagensmuster als auch die Verschlechterung der Materialsteifigkeit bei unterschiedlichen Belastungsebenen ermöglichen. Die Antwort von Beton umfasst ein breites Spektrum in verschiedenen Spannungszuständen aufgrund ihrer komplexen heterogenen Natur. Darüber hinaus führen die Entfestigung und Lokalisierung, verbunden mit konstitutiven Gesetzen des Betons, zu höheren Rechenanforderungen im postelastischen Bereich und erfordern Regularisierungstechniken, um die Konvergenz und Netzobjektivität sicherzustellen. Die vorliegende Arbeit soll dazu beitragen, zuverlässige Berechnungsmodelle für Beton zu entwickeln. Unter Verwendung der Microplane Theorie werden drei implizite Gradientenmodelle formuliert: Schädigung, Plastizität und gekoppelte Schädigungsplastizität. Die reinen Schädigungs- und Plastizitätsmodelle versorgen vereinfachte Ansätze zur Beschreibung von Beton unter monotoner Belastung, während das gekoppelte Modell es ermöglicht, Beton unter allgemeiner zyklischer triaxialer Belastung zu simulieren.

Plastizitätsmodelle befassen sich mit der Beschreibung permanenter Deformationen, die durch die mikrostrukturelle Bewegung entlang von Gleitebenen induziert werden, während die Materialintegrität nicht beeinflusst wird. Im Gegensatz dazu behandeln Schadensmodelle den Verlust der Materialintegrität, der durch die Initiierung und Ausbreitung von Mikrorissen verursacht wird. Das Betonverhalten folgt typischerweise einer Kombination dieser beiden Prozesse und ein verallgemeinerter Ansatz für Beton sollte Plastizität und Schaden verbinden. Alle Modelle dieser Arbeit sind in der Microplane Theorie formuliert. Dies vereinfacht die Materialgesetze und führt automatisch zu einer induzierten Anisotropie.

Regularisierung durch den impliziten Gradientenansatz stellt die numerische Stabilität und die Netzunabhängigkeit der Modelle sicher. Es ist bekannt, dass Dehnungsentfestigung und lokalisierte Deformationen nicht in lokale kontinuumsmechanische Modelle integriert werden können. Die implizite Gradientenerweiterung ist eine robuste Form von nichtlokalen und höheren Kontinuumstheorien, wobei die nichtlokale Wechselwirkung im Material durch Definition neuer Freiheitsgrade erreicht wird, die durch zusätzliche partielle Differentialgleichungen gesteuert werden. Die Formulierung und Implementierung der vorgeschlagenen Ansätze in einem impliziten 3D-Finite-Elemente-Code wird im Detail diskutiert. Die Algorithmen zur Berechnung des Tangentenmoduls und des Return-Mappings werden bereitgestellt, um die Reproduktion der Ergebnisse zu erleichtern.

Experimentelle Strategien zur Identifizierung der Parameter des gekoppelten Modells werden vorgeschlagen. Schließlich wird die Anwendbarkeit der entwickelten Ansätze an mehreren Beispielen zu Beton- und Stahlbeton untersucht. Die Netzobjektivität und die quadratische Konvergenz werden auch für die verschiedenen Modelle überprüft.