

Alexander Fuchs

On the Numerical Multiscale Analysis of Mineral Based Composites using Machine Learning



Institute for
Structural Analysis

Summary

Composite materials offer innovative and promising perspectives in many engineering fields due to their outstanding properties. These materials are based on the combination of different constituents in order to design a material with specific and beneficial characteristics, which result from the synergetic interactions at the underlying micro- or mesostructure. The optimal utilization of the composite capabilities requires the identification and understanding of the essential load bearing and damage mechanisms at the mesostructural level and an incorporation of this characteristics in the design of a macroscopic structure.

The thesis at hand contributes to a framework for the numerical multiscale analysis of composite materials with a focus on Textile Reinforced Concrete (TRC) as a mineral based composite. This framework aims to provide numerical tools for a profound understanding of the mesomechanical processes and to consider the effective mechanical response of the composite in a macroscopic analysis.

The presented mesomechanical investigation of TRC is based on the development of an appropriate Representative Volume Element (RVE) in terms of a finite element model, which captures the mesostructural setup as well as the dominant characteristics of the individual constituents and their interactions at the material interfaces. To account for the complex material behavior of the concrete matrix at multiaxial loading conditions, a gradient enhanced viscoplasticity damage microplane model is introduced. The textile yarns are modeled as unidirectional layers with a linear elastic transversal isotropic behavior. Furthermore, the relevant bond mechanisms, such as debonding, friction and contact, are taken into account by an adequate interface formulation. The introduced models are verified by numerical examples and calibrated by corresponding experiments.

Based on the developed RVE, a mesomechanical characterization of the composite behavior is achieved by a Numerical Material Testing (NMT) procedure. In this method, the dominant damage and load bearing mechanisms are investigated by a mesostructural analysis and the effective composite behavior is obtained for several load cases.

In order to incorporate the knowledge and information gained from a NMT at the macroscale, a neural network based homogenization approach is introduced and an according computational framework is developed. The main idea of this approach is the representation of the effective composite behavior by a neural network constitutive description in the analysis of a macroscopic structure. Moreover, a hyper-parameter optimization strategy is presented, to improve the prediction accuracy and training efficiency of a neural network. This strategy is based on the interpretation of the optimization procedure as a combinatorial game, which is mastered by the introduced deep reinforcement learning algorithm. The capabilities of the presented approaches are successfully tested in several numerical examples to verify and demonstrate their potential as promising alternative framework to numerical multiscale analysis.

Zusammenfassung

Verbundwerkstoffe ermöglichen durch ihre bemerkenswerten Materialeigenschaften eine vielversprechende und innovative Perspektive in zahlreichen Ingenieur Anwendungen. Diese Materialien basieren auf der Kombination verschiedener Grundwerkstoffe, um ein Verbundmaterial mit spezifischen und vorteilhaften Charakteristiken zu generieren, welche durch die synergetischen Interaktionen der zugrundeliegenden Mikro- oder Mesostrukturen begründet sind. Die optimale Ausnutzung der Verbundeigenschaften erfordert die Identifikation und Beschreibung der essentiellen Tragmechanismen und Schadenscharakteristiken der Mesostruktur sowie deren Berücksichtigung beim Entwurf makroskopischer Strukturen.

Mit der vorliegenden Arbeit wird ein Framework für die numerische Mehrskalanalyse von Kompositmaterialien mit Fokus auf Textil-verstärktem Beton (Textile Reinforced Concrete, TRC) als mineralisch basierter Verbundwerkstoff bereitgestellt. Dieser Ansatz umfasst numerische Analysemethoden zum tiefgreifenden Verständnis mesomechanischer Vorgänge und der Berücksichtigung effektiver Materialantworten in einer makroskopischen Strukturanalyse.

Die numerische mesomechanische Untersuchung des TRC erfolgt auf Grundlage eines in dieser Arbeit entwickelten repräsentativen Volumenelements (Representative Volume Element, RVE) im Sinne eines finite Elemente Strukturmodells, welches sowohl den mesostrukturellen Aufbau als auch die dominanten Materialcharakteristiken der Grundwerkstoffe sowie deren mechanische Interaktionen und den materiellen Grenzflächen erfasst. Das komplexe Materialverhalten der Betonmatrix unter multiaxialer Belastung wird mit einem gradienten-erweiterten viskoplastischen Microplane-Schädigungsmodell abgebildet, welches in dieser Arbeit vorgestellt wird. Die textilen Verstärkungselemente werden als unidirektionale Schicht mit linear elastisch transversal isotropen Materialeigenschaften abgebildet. Signifikante Verbundeigenschaften, wie bspw. Ablösen, Reibung und Kontakt, werden durch adäquate Interface-Formulierungen in der numerischen Analyse berücksichtigt. Numerische Experimente dienen der Verifikation der numerischen Modelle, welche anhand physikalischer Experimente kalibriert werden.

Das entwickelte RVE dient, im Rahmen numerischer Materialtests (Numerical Material Testing, NMT), als Grundlage der mesomechanischen Charakterisierung des Komposits. Hierbei werden wesentliche Schadens- und Belastungsmoden unter verschiedenen Lastsituationen in einer numerischen Analyse der Mesostruktur untersucht und das effektive Materialverhalten ausgewertet.

Für das Einbeziehen der gewonnen Erkenntnisse und Informationen numerischer Materialtests auf der Makroskala wird ein Homogenisierungsansatz auf Basis neuronaler Netze vorgestellt und ein neuartiges Berechnungskonzept entwickelt. Die Grundidee für diesen Ansatz besteht in der Anwendung neuronaler Netze zur Repräsentation des effektiven Materialverhaltens des Verbundwerkstoffs. Darüber hinaus wird eine innovative Optimierungsstrategie für die Ermittlung der Hyperparameter präsentiert,

welche auf eine verbesserte Prognosegüte und Trainingseffizienz des neuronalen Netzes führt. Die Grundlage für diesen Ansatz bildet die Interpretation der Optimierungsaufgabe als Kombinationsspiel im Sinne der spieltheoretischen Annahmen, welches mit den entwickelten deep reinforcement Lernalgorithmus gemeistert wird. Im Rahmen numerischer Experimente werden die vorgestellten Methoden verifiziert und deren Potential als alternatives Berechnungskonzept zur numerischen Mehrskalenanalyse verdeutlicht.