

Numerical Analysis of Damage and Fracture in Wooden Structures

Numerische Analyse von Versagen und Bruch in Holzkonstruktionen

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

Dissertation

von
M.T. Dennie Supriatna
geboren am 19. Dezember 1981 in Indonesien

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Technische Universität Dresden
Prof. Dr.-Ing. habil. Udo Nackenhorst
Leibniz Universität Hannover
Prof. Dr.-techn. Josef Füssl
Technische Universität Wien

Tag der Einreichung: 20. July 2022

Tag der Verteidigung: 08. Dezember 2022

Summary

The work at hand is concerned with the further development of the constitutive modeling of wood within the finite element framework. The ductile and brittle behavior of wood is investigated, numerically modeled and calibrated to related experiments, particularly in the case of dynamic loading. Wood exhibits ductile behavior when subjected to compressive loads and brittle behavior, when subjected to shear loads, tensile loads, or a combination thereof. Therefore, a novel material model is developed to capture the ductile failure of wood at dynamic loading with different moisture contents. A visco-plasticity model with a multi-surface criterion is introduced to capture the high strain-rate effect for finite deformation problems. Anisotropic damage is considered to model softening after yielding. Gradient enhancement is applied in the damage model to avoid pathological mesh dependency and localization. The Split HOPKINSON Pressure Bar (SHPB) test, which deals with the wave propagation phenomenon through the specimen, is simulated. Additionally, a novel time integration scheme the so-called three-point backward EULER approach is developed and applied to the simulation. This new time integration is derived to overcome the problem in the NEWMARK integration scheme, which does not consistently preserve momentum and energy.

Furthermore, the dynamic behavior of wood for ductile failures is investigated theoretically and calibrated to experiments. Here, the Split HOPKINSON Pressure Bar test, which is based on the wave propagation of the compressive strain wave due to impact, is simulated to capture the behavior of wood at a high strain-rate. In addition, compressive crushing tests are performed for the intermediate strain-rate and low strain-rate (quasi-static). Particularly for the SHPB test, this work deals with the experimental and theoretical aspects of the test and the design consideration of the test, specifically for Norway Spruce (*Picea Abies*) wood. Physical and numerical simulations have been performed in the design process of the SHPB test. Interactions between both types of simulations are considered to identify the required strain-rate while the wooden specimen is in the inelastic regime. Several quantities have to be determined, i.e., the geometry and material components of the SHPB along with the impact velocities of the projectile bar. These unknown quantities lead to a complex procedure of the SHPB design, in which numerical simulations of the experiment need to be performed.

The phase-field approach is chosen to describe brittle behavior of wood. A framework so-called *Representative Crack Element* (RCE) is developed and adopted to describe the crack. This framework has correct and realistic kinematics, enabling features such as the re-contacting after crack formation, the possibility to apply anisotropic material, friction and multi-physics. The previous existing splits, such as the volumetric-deviatoric (VD) and spectral, have no realistic crack kinematics, which therefore should not be used for wood as a strongly anisotropic material. Self-consistency tests are performed to measure the VD and spectral split behavior and to compare them with discrete cracks. From the self-consistent test, the RCE approach has the exact behavior as the discrete crack for isotropic and anisotropic material, which is not the case for the VD and spectral decompositions for isotropic material. Within this work, the development of the RCE is performed gradually from the simplest case, i.e., for a linear elastic isotropic material, to the more complex and advanced material, including anisotropy and hygro-mechanical coupling. Anisotropic fracture behavior is represented by introducing the anisotropy into the critical energy release-rate. The phase-field is also enhanced by splitting the driving energy into Mode I and Mode II to give a more realistic prediction for wood. During the development process, several benchmarks are presented to show the capability of the model. For an isotropic material, a canonical benchmark of a plate with double notch is simulated. Several structural examples are presented for wood, e.g., Brazilian notched specimen, a corner-notched timber beam and a laminated timber beam with a circular opening.

A multi-FICKEAN approach, which has two phases of water concentrations in wood as bound water and water vapor, is adopted to model moisture and diffusion. This approach has an excellent performance in modeling the diffusion through minimal non-FICKEAN deviation. This two-phase model is coupled to the RCE framework to describe the moisture behavior in the presence of a crack. Moisture-induced cracks are presented as benchmark problems, which involves the drying process of restrained wood so that tensile stress develops.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden neue Entwicklungen der konstitutiven Modellierung von Holz im Rahmen der Finite Elemente Methode vorgestellt. Das duktile und spröde Materialverhalten von Holz, insbesondere unter dynamischer Belastung, wird untersucht, numerisch modelliert und anhand geeigneter Experimente kalibriert. Holz zeigt unter Druckbelastung ein duktiler, unter Schub- oder Zugbelastung ein sprödes Materialverhalten. Ein neues Materialmodell, welches das duktile Versagen von Holz unter dynamischer Belastung und unterschiedlichen Holzfeuchtegehalten berücksichtigt, wird entwickelt. Weiterhin wird ein viskoses Mehrflächenplastizitätsmodell, welches das Materialverhalten bei großen Dehnraten und finiten Deformationen beschreibt, entwickelt. Für die Modellierung der Entfestigung im plastischen Bereich wird eine anisotrope Schädigung genutzt. Um eine Netzabhängigkeit und Lokalisierung zu vermeiden, wird eine nichtlokale Schädigungsformulierung nach der erweiterten Gradientenmethode angewendet. Der Split-HOPKINSON-Pressure-Bar-Versuch (SHPB), mit der die mechanische Wellenausbreitung durch den Probekörper untersucht werden kann, wird simuliert. Zusätzlich wird eine neue Zeitintegrationsmethode, die sogenannte Dreipunkt-Rückwärts-Euler-Methode entwickelt und für die Simulation angewendet. Die neue Zeitschrittintegration wird eingeführt, um den Nachteil der NEWMARK-Integrationsmethode, die Impuls- und Energieerhaltung nicht konsistent zu gewährleisten, zu überwinden.

Des Weiteren wird das dynamische Verhalten von Holz bei duktilem Versagen theoretisch untersucht und anhand von Experimenten kalibriert. Die Simulation des Split-HOPKINSON-Pressure-Bar-Versuchs, welcher auf der durch einen Stoß verursachten Ausbreitung einer Druckwelle durch den Probekörper basiert, berücksichtigt somit das Materialverhalten von Holz bei einer hohen Dehnraten. Zusätzlich werden Druckversuche bei mittlerer und geringer Dehnraten (quasi-statisch) durchgeführt. Insbesondere für den SHPB-Versuch enthält die vorliegende Arbeit experimentelle und theoretische Aspekte zu dem Versuch und dem Versuchsentwurf, welcher spezifisch für Probekörper aus gemeinem Fichtenholz (*Picea Abies*) entworfen wird. Der Entwurfsprozess wird durch experimentelle Vorstudien und numerische Simulationen gestützt. Durch die iterative Annäherung der Vorstudien- und Simulationsergebnisse wird die erforderliche Dehnraten, für die sich der Holzprobekörper im gewünschten nichtelastischen Bereich befindet, identifiziert. Dieses Vorgehen ermöglicht die Bestimmung der experimentellen Versuchsanordnung, wie der Geometrie- und Materialkennwerte des SHPB sowie die Stoßgeschwindigkeit des Projektilbalkens. Aufgrund dieser unbekannt GröÙen wird die komplexe Entwurfsprozedur des SHPB-Versuchs mittels des iterativen Vorgehens aus numerischer Simulation und Experiment erforderlich.

Für die Beschreibung des spröden Versagens von Holz wird ein Phasenfeldansatz gewählt. Zur Beschreibung des Risses wird ein sogenanntes repräsentatives Risselement (RCE) entwickelt. Mit diesem Konzept kann eine unphysikalische Risskinematik vermieden werden. Phänomene, wie der Kontakt der Rissflanken, anisotropes Materialverhalten, Reibung und Multiphysikalische Prozesse können dadurch berücksichtigt werden. Die bisher existierenden Split-Methoden haben keine realistische Risskinematik und sollten aus diesem Grund nicht für das stark anisotrope Material Holz verwendet werden. Selbstkonsistenztests werden durchgeführt, um die Methoden des Volumetrisch-Deviatorischen (VD) und des Spektralsplits zu analysieren und mit der Methode Diskreter Risse zu vergleichen. Für isotropes und insbesondere für anisotropes Materialverhalten bescheinigt der Selbstkonsistenztest dem RCE-Ansatz ein dem Diskreten-Riss-Ansatz vergleichbar realitätsnahes Verhalten. In dieser Arbeit wird die RCE-Entwicklung schrittweise durchgeführt, beginnend mit einem linear-elastischen isotropen Material und der folgenden Erweiterung für komplexere anisotrope und hygromechanisch gekoppelte Materialformulierungen. Das richtungsabhängige Bruchverhalten wird

durch die Berücksichtigung der Anisotropie in der kritischen Energiefreisetzungsrate repräsentiert. Das Phasenfeld wird durch die Aufteilung der risstreibenden Energie auf Anteile in Mode-I und Mode-II erweitert. Der Entwicklungsprozess wird durch entsprechende Benchmark-Simulationen begleitet, die das Potenzial Fähigkeit der Modellierung zeigen. Für das isotrope Materialverhalten wird ein etabliertes Benchmark-Beispiel einer zweiseitig geschlitzten Scheibe simuliert. Mehrere Strukturbeispiele, wie der Prüfkörper des Brazilian-Tests, ein ausgeklinkter Holzbalken sowie ein Brettschichtholzträger mit einem kreisförmigen Durchbruch, dienen als Modellproblem zur Abbildung des anisotropen Materialverhaltens von Holz. Ein multi-FICKSCHER Ansatz, der die zwei HolzfeuchtePhasen des gebundenen Wassers und des Wasserdampfs berücksichtigt, wird für die Feuchte- und Diffusionsmodellierung verwendet. Dieser Ansatz ist in der Lage, die Diffusion realitätsnah mit Berücksichtigung des sogenannten nicht-FICKSCHEN Verhaltens zu beschreiben. Durch die Kopplung dieses zweiphasigen Feuchtetransportmodells mit dem RCE-Ansatz kann das feuchteabhängige Verhalten bei Vorhandensein eines Risses beschrieben werden. Die Simulation feuchteinduzierter Risse wird an einem Modellproblem präsentiert, in dem während der Trocknung durch behindertes Schwinden Zugspannungen zum Reißen der Probe führen.