

Kurzfassung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung und Validierung eines mechanisch-mathematischen Modells zur Simulation des Tragverhaltens quasi-statisch belasteter, unbewehrter Betonstrukturen. Mit dem entwickelten Modell werden charakteristische Betoneigenschaften wie Entfestigung unter Zug- oder Druckbeanspruchungen sowie die belastungsinduzierte Anisotropie als Folge von Rissbildung, -wachstum und –zusammenschlüssen erfasst.

Grundlage der Materialbeschreibung ist die makroskopische Betrachtungsweise des heterogenen Betongefüges, um die Anwendbarkeit auf die Simulation gesamter Tragwerke zu ermöglichen. Zur Darstellung des Werkstoffverhaltens auf der makroskopischen Ebene wird die Schädigungstheorie als Teilgebiet der Kontinuumsmechanik gewählt. Das Phänomen der Rissbildung und -entwicklung wird dabei nicht durch diskret modellierte Risse, sondern durch die Beschreibung der Degradation der elastischen Kennwerte des homogenisierten Materials berücksichtigt. Zu diesem Zweck wird ein symmetrischer Integritätstensor zweiter Stufe als innere Variable in das Modell eingeführt, welcher die Beschreibung von Schädigung in drei zueinander orthogonalen Materialrichtungen erlaubt. Die phänomenologisch motivierte Formulierung der Schädigungsentwicklung basiert auf der spektralen Zerlegung des inkrementellen Integritätstensors. Sowohl dessen Evolution als auch die vorgeschlagenen, gekoppelten Schädigungsgrenzbedingungen werden in Abhängigkeit der Eigenwerte und Hauptrichtungen des Dehnungstensors beschrieben.

Um bei Strukturberechnungen auf der Basis der Finite-Elemente-Methode Ergebnisse zu erhalten, welche unabhängig von der gewählten Diskretisierung sind, werden Regularisierungsansätze formuliert und im Hinblick auf ihre praktische Anwendbarkeit bewertet. Der neuartige, lokale, bruchenergiebasierte Ansatz erweist sich dabei als numerisch robust und leicht implementierbar, eignet sich jedoch nicht zur Bestimmung der Ausdehnung der Prozesszone in der Simulation. Dies wird hingegen bei Verwendung der untersuchten nichtlokalen Methode vom Integraltyp möglich, allerdings auf Kosten eines höheren numerischen Aufwands und längerer Rechenzeiten.

Die Anwendbarkeit des entwickelten Schädigungsstoffgesetzes und der Regularisierungsansätze auf mehraxiale Problemstellungen mit komplexen Randbedingungen und Belastungen wird anhand von Finite-Elemente-Simulationen gut dokumentierter Versuche an unbewehrten Betonbauteilen nachgewiesen. Experimentelle Ergebnisse in Form von Last-Verschiebungskurven können grundsätzlich zutreffend numerisch wiedergegeben werden. Die netzunabhängige Darstellung gekrümmter Risspfade gelingt dagegen nur bei Verwendung der nichtlokalen Schädigungsformulierung.

Das entwickelte Stoffgesetz basiert auf einer geringen Anzahl vorzugebender Materialkennwerte, welche zudem unmittelbar aus den Normen entnommen oder aus einfachen Belastungsversuchen ermittelt werden können. Damit ist die Verständlichkeit für Anwender ohne umfangreiche materialtheoretische Kenntnisse gewährleistet.

Thesen

- Die makroskopische Betrachtungsweise der heterogenen Gefügestruktur unbewehrter Betone ist Voraussetzung für die Verwendung eines Stoffgesetzes im Rahmen von numerischen Simulationen gesamter Tragwerke.
- Aufgrund der qualitativ unterschiedlichen Versagensmechanismen normalfester und hochfester Betone unter vorwiegender *Druck*belastung erfordert die Beschreibung ihres Verhaltens in einem einheitlichen Ansatz die Einbeziehung der Meso- bzw. Mikrostruktur des Werkstoffgefüges. Das entwickelte kontinuumsmechanische Stoffgesetz ist daher auf Problemstellungen mit vorwiegendem *Zug*versagen beschränkt.
- Die Kontinuumsschädigungsmechanik stellt ein geeignetes Werkzeug zur Beschreibung wesentlicher Merkmale vorwiegend zugbelasteter Betonbauteile dar. Zu diesen Eigenschaften gehören das entfestigende Materialverhalten sowie die belastungsinduzierte Anisotropie als Folge der Rissbildung und –entwicklung im Betongefüge.
- Die Wahl des symmetrischen Integritätstensors zweiter Stufe als innere Variable beschränkt die im Modell erfassbare Materialsymmetrie auf den Sonderfall der Orthotropie. Diese Vereinfachung ist gerechtfertigt, da auch in den Experimenten, auf deren Basis das Stoffgesetz kalibriert wird, orthotrope Materialzustände vorlagen.
- Die phänomenologisch motivierte Beschreibung der Schädigungsevolution und der Schädigungsgrenzbedingungen in Abhängigkeit von Eigenwerten und Hauptrichtungen des Dehnungstensors stellt eine angemessene Vorgehensweise für heterogene Materialien wie Beton dar. Somit werden Formulierungen in Abhängigkeit von energetischen Größen, deren physikalische Bedeutung zumeist schwer nachvollziehbar ist, vermieden.
- Netzunabhängige Ergebnisse von Finite-Elemente-Simulationen können nur durch Einbeziehung von Regularisierungsmethoden in das Stoffgesetz erhalten werden. Der neuartige, lokale, bruchenergiebasierte Ansatz ist numerisch robust und leicht implementierbar, eignet sich jedoch nicht zur Bestimmung der Ausdehnung der Prozesszone in der Simulation. Dies wird erst bei Verwendung der Integraltypmethode, basierend auf der nichtlokalen Mittelung der Schädigungsvariablen, möglich, allerdings auf Kosten eines höheren numerischen Aufwands und deutlich längerer Rechenzeiten.
- Die Anwendbarkeit der Materialbeschreibung auf Probleme mit komplexen Randbedingungen wurde durch die Simulation entsprechender Versuche nachgewiesen. Die experimentell bestimmten Maximallasten können sowohl mit dem lokalen, bruchenergiebasierten Ansatz als auch mit der nichtlokalen Regularisierungsmethode rechnerisch bestätigt werden. Die netzunabhängige Wiedergabe geneigter Risspfade gelingt hingegen nur mit dem nichtlokalen Regularisierungsansatz vom Integraltyp.
- Das entwickelte Schädigungsstoffgesetz basiert auf einer geringen Anzahl leicht bestimmbarer Materialkennwerte. Daher ist die Verständlichkeit auch für Anwender ohne umfangreiche materialtheoretische Kenntnisse gewährleistet.

Theses

- The application of a constitutive law for numerical simulations of entire supporting structures requires the macroscopic consideration of the heterogeneous structure of plain concrete.
- Due to the qualitatively different failure mechanisms of concretes with normal and high strengths subject to predominant *compressive* loading, their description within a unified approach necessitates the consideration of the material's mesostructure or microstructure, respectively. Thus, the proposed constitutive law based on continuum mechanics is restricted to problems with predominant *tensile* loading.
- Continuum damage mechanics represents an adequate framework for the characterization of properties of predominantly tensile loaded concrete such as softening behavior and load-induced anisotropy caused by crack initiation and crack development within the concrete structure.
- The introduction of the symmetric second-order integrity tensor as internal variable limits the material symmetry to the special case of orthotropy. This simplification is acceptable since the experiments which represent the base for the calibration of the constitutive law lead to orthotropic material states, too.
- The phenomenologically motivated description of damage evolution and damage limit conditions in dependence on the eigenvalues and principal directions of the elastic strain tensor represents an appropriate approach for heterogeneous materials such as plain concrete. Consequently, formulations in terms of energetic quantities with mostly irreproducible physical meanings are avoided.
- Mesh-independent results of finite element simulations can only be obtained if regularization methods are included in the constitutive relations. The novel, local and fracture-energy based approach proves to be numerically robust and can easily be implemented, but is not suited for the determination of the process zone dimension in the simulation. The latter drawback is eliminated if the integral-type method based on weighted averaging of the damage variable is used, even though at the expense of increased numerical effort and considerably longer calculating times.
- The applicability of the material formulation for multi-axial problems offering complex boundary and loading conditions is demonstrated by means of simulations of appropriate experiments with plain concrete specimens. The maximum loads determined during the tests can numerically be reproduced with both the local, fracture-energy based approach and with the non-local method. In contrast, the mesh-independent depiction of inclined and curved crack paths only succeeds if the non-local integral-type regularization approach is used.
- The proposed damage constitutive law is based on a small number of easily determinable material parameters. Thus, understandability is ensured for users without comprehensive knowledge in the field of material theories.

Abstract

Development and validation of a mechanical-mathematical model for the simulation of bearing behavior of plain concrete structures under quasi-static loading are the purposes of this work. Characteristic concrete properties such as softening under tensile or compressive loading as well as load-induced anisotropy as a result of crack initiation, growth and coalescence are covered by the proposed material description.

The constitutive law is based on macroscopic consideration of the heterogeneous concrete structure in order to allow for simulations of entire bearing structures. The damage theory as branch of continuum mechanics is chosen to characterize the material behavior on this macroscopic level. In this context, the phenomenon of crack initiation and development is not taken into account by means of discretely modelled cracks but by the description of degradation of the elastic properties of the homogenized material. For this purpose, a symmetric second-order integrity tensor is introduced as internal model variable, which permits the characterization of damage in three mutually orthogonal material directions. The phenomenologically motivated formulation of damage evolution is based on spectral decomposition of the incremental integrity tensor. Both its evolution and the proposed coupled damage limit conditions are specified in dependence on eigenvalues and principal directions of the elastic strain tensor.

In order to obtain results of structural calculations based on the finite element method, which are independent of the used discretization, regularization approaches are formulated and investigated with regard to their practical applicability. The novel local, fracture-energy based approach proves to be numerically robust and can easily be implemented, but is not suited for determination of the process zone dimension in the simulation. The latter drawback is eliminated if the examined non-local approach of integral type is used, even though at the expense of increased numerical effort and longer calculating times.

The applicability of the developed damage constitutive law and of the regularization methods for multi-axial problems offering complex boundary and loading conditions is demonstrated by means of finite element simulations of well-documented experiments with plain concrete specimens. Test data in terms of load-displacement relationships are correctly reproduced. In contrast, mesh-independent depiction of curved crack paths only succeeds if the non-local damage model is used.

The developed damage constitutive law is based on a small number of material parameters. Moreover, these specific values can directly be taken from standards or determined from simple experiments. Thus, understandability is ensured for users without comprehensive knowledge in the field of material theories.