

Modelling of Dynamically Loaded Concrete Structures by the Microplane Approach at Finite Strains

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

Dissertation

von

Bobby Rio Indriyantho, M.T.
geboren am 6. Januar 1991 in Temanggung, Indonesien

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske (Technische Universität Dresden)

Prof. Dr.-Ing. habil. Joško Ožbolt (Universität Stuttgart)

Prof. Dr.-Ing. habil. Udo Nackenhorst (Leibniz Universität Hannover)

Tag der Einreichung: 29. September 2020

Tag der Verteidigung: 18. Januar 2021

Summary

Design and analysis in many civil engineering aspects, in particular for concrete structures, require nonlinear finite element simulations in order to assess and evaluate failure patterns as a result of natural disasters or degradation of the loading capacity of buildings due to many human being's activities. Concrete is a material used at most in building construction, which is combined with steel reinforcements or other materials as a structure. Due to its heterogeneous nature, various responses of concrete occurred at different loading states may lead to unstable solutions in numerical analyses. For modelling concrete numerically, the crucial problem is strain softening as well as strain localisation at the inelastic regime, which affects mesh sensitivity and slow convergence rates. By modelling a robust and more realistic approach for concrete, the thesis at hand aims to provide a beneficial contribution to the wide range of computational engineering fields.

Concrete is a quasi-brittle material which has typically infinitesimal strain responses. At high confined pressure loading and some dynamic cases e.g. high velocity impacts, however, extremely large strains occur in concrete at the inelastic region, whereas finite deformations can be indicated by concrete forming into rubble which has no stiffness further due to the absence of high pressure. To represent largely deformed structures due to these phenomena, an extension of the microplane model from small strains to finite strains is inevitable. Nonlocal damage and plasticity using the well-known DRUCKER-PRAGER yield criterion are incorporated within the volumetric-deviatoric microplane approach at finite strains. Moreover, to avoid pathological mesh sensitivity as well as to achieve stable solutions, the proposed model is regularised by implicit gradient enhancement.

Besides rate dependency, the proposed model is supplemented by a coupled contact mechanism and adaptive element erosion for modelling a more realistic dynamic case such as high velocity impact on concrete. The damaged elements need to be eliminated in order to yield a better approximation of the crack and failure patterns for concrete structures. The failure criterion is based on the damage value obtained by the proposed plastic-damage microplane approach. Finally, the developed model is utilised to simulate several cases under quasi-static loading as well as dynamic loading and the results are then compared to existing experimental investigations. The capability of the newly proposed model is evaluated and examined by performing various simulations including plain concrete and reinforced concrete as well. The high confined pressure on the tube-squash test, blast loading on reinforced concrete beams, and high velocity impacts are carried out in the present contribution.

Zusammenfassung

In vielen Aspekten des Bauingenieurwesens, insbesondere bei Betonkonstruktionen, erfordern Entwurf und Analyse nichtlineare Finite-Elemente-Simulationen, um die Versagensmuster infolge von Naturkatastrophen oder Verschlechterung der Belastbarkeit von Strukturen aufgrund vieler menschlicher Aktivitäten zu bewerten. Beton ist ein Material, das hauptsächlich im Hochbau verwendet wird und mit Stahlbewehrungen oder anderen Materialien zu einer Struktur kombiniert wird. Aufgrund seiner heterogenen Natur können Materialverhalten des Betons bei unterschiedlichen Belastungszuständen zu instabilen Lösungen der numerischen Analysen führen. Für die numerische Modellierung von Beton ist ein entscheidendes Problem die Verzerrungsweichung sowie die Verzerrungslokalisierung im inelastischen Bereich, was sich auf die Netzabhängigkeit und die langsamen Konvergenzraten auswirkt. Durch die Modellierung mit einem robusten und realistischeren Ansatz für Beton soll die vorliegende Arbeit einen innovativen Beitrag zu den vielfältigen Bereichen der numerischen Materialsimulation leisten.

Beton ist ein quasi-sprödes Material, das typischerweise infinitesimale Verzerrungsreaktionen aufweist. Bei hoher Druckbelastung und einigen dynamischen Lastfällen, z.B. Stößen mit hoher Geschwindigkeit, treten jedoch im inelastischen Bereich extrem große Verzerrungen im Beton auf, während große Verformungen durch zerstörten Beton angezeigt werden können, der keine weitere Steifigkeit aufweist. Um aufgrund dieser Phänomene weitgehend deformierte Strukturen darzustellen, ist die Erweiterung des Microplane-Modells von kleinen Verzerrungen auf große Verzerrungen unvermeidlich. Die nichtlokale Schädigung und Plastizität unter Anwendung des bekannten DRUCKER-PRAGER-Fließkriteriums wird in den volumetrisch-deviatorischen Microplane-Ansatz bei großen Verzerrungen einbezogen. Darüber hinaus wird das vorgeschlagene Modell durch die implizite Gradientenerweiterung reguliert, um die Empfindlichkeit gegenüber pathologischen Netzen zu vermeiden und stabile Lösungen zu erzielen.

Neben der Ratenabhängigkeit wird das vorgeschlagene Modell durch einen gekoppelten Kontaktmechanismus und eine adaptive Elementerosion ergänzt, um einen realistischeren dynamischen Fall, wie einen Stoß mit hoher Geschwindigkeit, zu modellieren. Die geschädigten Elemente müssen eliminiert werden, um eine bessere Approximation der Riss- und Versagensmuster für Betonkonstruktionen zu erhalten. Das Versagenskriterium basiert auf dem Wert der Schädigung, der durch den vorgeschlagenen Microplane-Ansatz mit plastischer Schädigung erhalten wird. Schließlich wird das entwickelte Modell verwendet, um mehrere Fälle unter quasi-statischer und dynamischer Belastung zu simulieren und die Ergebnisse dann mit bestehenden experimentellen Untersuchungen zu vergleichen. Die Leistungsfähigkeit des neuen vorgeschlagenen Modells wird anhand verschiedener Beispiele untersucht und bewertet, einschließlich des Normalbetons und des Stahlbetons. In der vorliegenden Arbeit werden der hohe Druck auf die Rohr-Quetsch-Prüfung, die Explosionsbelastung von Stahlbetonbalken und die Stöße mit hoher Geschwindigkeit als Beispiele ausgeführt.