

Experimentelle Grundlagen für die meso- und makroskopische Modellierung von Beton bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten

Eine kritische Beurteilung des Dehnrateneffekts

Experimental fundamentals for the meso and macroscopic modeling of
concrete at high loading velocities

A critical review of the strain rate effect

Von der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Tino Kühn (fh), M.Sc.
geboren am 16. Juli 1974 in Freital

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe
Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser
Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

Tag der Verteidigung 10.02.2020

Kurzzusammenfassung

Die vorliegende Arbeit widmet sich detailliert der Frage von Geschwindigkeitseffekten bei der dynamischen Kennwertermittlung von Betonen. Der ursprüngliche Leitgedanke einer skalenübergreifenden numerischen Betrachtung der Geschwindigkeitseffekte und die Einbindung dieser Erkenntnisse in das makroskopische VERD-Modell wurde zugunsten einer detaillierten experimentellen Studie zum Dehnrateneinfluss verworfen. Es zeigte sich recht deutlich, dass die Ursachen vieler dieser Geschwindigkeitseffekte vor allem im experimentellen Umfeld und den zugrunde liegenden Annahmen zu finden sind, statt in der Reaktion des Werkstoffes. Der Autor liefert aus diesem Grunde notwendige Kennwerte und eine detaillierte Analyse der möglichen Ursachen, die zur Fehlinterpretation der stofflichen Reaktionen führen können. Er geht dabei davon aus, dass der klassische Dehnrateneffekt eine rein strukturelle Eigenschaft ist, die nichts mit einer stofflichen Kenngröße zu tun hat.

Die zugrunde liegende Daten von ca. 3000 Versuchen am SHB im Zug- und Druckbereich wurde über einen Zeitraum von ca. 6 Jahren als Grundlage für numerische Analysen auf meso- und makroskopischer Ebene geschaffen. Für die Bewertung werden den klassischen Methoden die eigenen Ansätze gegenübergestellt. Hierin gehen vor allem die Anlagen-spezifischen Wechselwirkungen mit ein. Dieser Ansatz wird ebenso konsequent bei der Betrachtung der statischen Referenzmethoden angewandt. Hier führt dies bspw. zu einer kritischen Bewertung des statischen Nachbruchverhaltens im Zugversuch. Diese Gesamtbetrachtung von Prüfmaschine und Prüfling ist dabei wesentlich und dem Maschinenbau- und Automatisierungstechnik-Hintergrund des Autors geschuldet.

Eine vom Autor entwickelte alternative Prüfmethodik am SHB erlaubt eine verbesserte statistische Bewertung der Ergebnisse. Sie ähnelt einem Perlschnurverfahren und verhindert als Abgrenzungsverfahren die Einbeziehung des Energieüberschusses in die Beurteilung von Festigkeiten. Eine konsequente Energiebetrachtung bezieht die kinetische Energie der resultierenden Bruchstücke in diese Bewertung mit ein. Zugleich wurden die resultierenden Bruchflächen ermittelt. Sie finden Anwendung in der Bewertung spezifischer Festigkeiten und Bruchenergien im Zugbereich oder bei der Quantifizierung einer Schädigung im Druckbereich. In Anlehnung an das VERD-Modell wurde ein Schädigungsansatz mit wenigen Parametern entwickelt und konsequent in die Auswertung der Einzelversuche integriert. Aus ihm lassen sich alle Wesentlichen stofflichen Kennwerte auch analytisch ableiten. Der entwickelte Ansatz zur Trägheitskompensation relativiert den scheinbaren Geschwindigkeitseffekt wesentlich.

Der Autor entscheidet sich bei seiner Herangehensweise bewusst für den Blick über den Tellerrand und hinterfragt kritisch etablierte Methoden wie beispielsweise den biaxialen Verlauf der Festigkeit im DIF-Diagramm nach Empfehlung der CEB. Auf eine logarithmische Darstellung eines sog. DIFs wird grundsätzlich verzichtet. Aufgrund der umfangreichen und systematischen Datenbasis lassen sich hierzu unzählige Fragen diskutieren. Der Autor beschränkt diese letztlich auf die Dokumentation der wesentlichsten Denkipulse.

Abstract

The presented work analyses in detail the questions of speed effects in the dynamic determination of concrete properties. The original idea of a cross-scaled numerical analysis of velocity effects and the integration of these findings into the macroscopic VERD-model has been abandoned in favour of a detailed experimental study of the so called strain rate influence. It became quite clear that the causes of many of these velocity effects can be found in the experimental environment and the underlying assumptions, rather than in the reaction of the pure material. For this reason, the author provides necessary parameters and a detailed analysis of the possible causes that may lead to the misinterpretation of those material reactions. He assumes that the classical strain rate effect is a purely structural property that has nothing to do with a reaction on the material level.

The underlying database of approx. 3.000 tests on the SHB in the tensile and compressive domain was compiled over a period of approx. 6 years as a basis for numerical analyses on a mesoscopic and macroscopic level. For the evaluation, the classical methods are compared with the own approaches. This mainly includes the facility-specific interactions. This approach is also as consistently applied when analysing the static reference methods. Here, for example, this leads to a critical review of the static post cracking behaviour in the tensile test. This overall consideration of testing facility and test specimens is essential and due to the mechanical engineering and automation technology background of the author.

An alternative testing methodology developed by the author for the SHB allows improved statistical evaluation of results. It resembles a fatigue testing method and it prevents the inclusion of a certain surplus of energy in the assessment of strengths. A consistent energy balance involves the kinetic energy of the resulting fragments in this evaluation. At the same time, the resulting fracture surfaces were determined and used in the evaluation of specific strengths and fracture energies in tension and in the quantification of damage in the compressive domain. Based on the VERD-model, a damage evolution approach with few parameters was developed and consistently integrated into the evaluation of the individual tests. From it, all essential material properties can also be derived analytically. The developed approach to inertia compensation significantly relativizes the apparent velocity effects.

In his approach, the author consciously decides to look beyond the box and critically scrutinizes established methods such as the biaxial course of the strength in the DIF-diagram as recommended by the CEB. A logarithmic representation of the DIFs are consciously avoided. Due to the extensive and systematic database, countless questions can be discussed. The author ultimately limits these to the documentation of the most essential thought impulses.