

Assessing and Modelling the Structural build-up of Concrete in the context of Digital Fabrication

Bewertung und Modellierung des Strukturaufbaus von Beton
im Kontext digitaler Fertigung

An der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung der Würde eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

eingereichte

DISSERTATION

Vorgelegt von

Irina IVANOVA, M. Sc.

eingereicht am 31.08.2022

Tag der mündlichen Prüfung: 19.12.2022

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Viktor MECHTCHERINE

Prof. Dr. Kamal H. KHAYAT (Missouri University of Science and Technology)

Prof. Dr.-Ing. Dirk LOWKE (Technische Universität Braunschweig)

Kurzfassung

Gegenwärtig bewegt sich die Bauindustrie schnell in Richtung Digitalisierung und Automatisierung, wodurch eine höhere Geschwindigkeit und Effizienz der Bauprozesse sowie mehr Freiheitsgrade bei der konstruktiven und architektonischen Gestaltung ermöglicht werden sollen. Unter allen in der Entwicklung befindlichen Technologien der additiven Fertigung scheint die digitale Herstellung durch schichtweise Extrusion die vielversprechendste Variante für eine zugige Überführung in die Baupraxis zu sein. Der Wegfall von Schalungsarbeiten macht den Bauprozess potenziell kosten- und zeitsparender, stellt jedoch vielfältige Herausforderungen an den Mischungsentwurf und die Prüfmethode, insbesondere im Hinblick auf das rheologische Verhalten von Frischbeton. Im Fokus steht dabei der Strukturaufbau von Beton im Ruhezustand, welcher die Verbaubarkeit maßgebend bestimmt, d. h. die Fähigkeit des Materials, die Form der extrudierten Stränge unter ihrem Eigengewicht und dem Gewicht der anschließend aufgetragenen Schichten beizubehalten.

In dieser Forschungsarbeit wurde der Strukturaufbau zementbasierter Materialien untersucht. Diese Untersuchungen umfassen die Entwicklung der Festigkeits- und Verformungseigenschaften über die Zeit im Ruhezustand sowie die Entwicklung und Verfeinerung der Methodik zur Charakterisierung des strukturellen Aufbaus, wie auch dessen Modellierung und Vorhersage.

Hinsichtlich der Methodik wurde das Hauptaugenmerk auf den Test mit konstanter Rotationsgeschwindigkeit (engl.: *constant rotational velocity*, CRV) zur Erfassung der statischen Fließgrenze und ihrer zeitlichen Entwicklung gerichtet. Auf der Grundlage einer großen Anzahl von Experimenten mit zwei Rheometern unterschiedlicher Bauart wurden charakteristische Kurven und Punkte ermittelt, die das Verhalten von zementbasierten Materialien während eines CRV-Tests beschreiben. Des Weiteren wurden die Auswirkungen von Änderungen an Hauptelementen des CRV-Testprotokolls auf die Testergebnisse untersucht. Dazu gehörten der Testansatz (Einzel- gegenüber Mehrchargen-Ansatz), die Vorscherung und die angewendete Rotationsgeschwindigkeit. Es wurden mögliche Versuchsfehler beleuchtet und Methoden zur Verbesserung des Testverfahrens und Datenauswertung vorgeschlagen. Insbesondere wurde der Einzelchargen-Ansatz durch die Implementierung des entwickelten Abbruchkriteriums verbessert, ein Konzept der Nullmessung für nicht vorgescherte Proben eingeführt und ein Verfahren zur vereinfachten Bewertung der Elastizität durch ein Einkopf-Rheometer vorgeschlagen. Außerdem wurden allgemeine methodische Empfehlungen zur Gestaltung eines CRV-Prüfprotokolls formuliert. Die Ergebnisse sind auf verschiedene zementbasierte Materialien anwendbar und nicht auf Betone für den schichtweisen Extrusionsprozess beschränkt.

Darüber hinaus wurden Prüfverfahren zur Bewertung des Strukturaufbaus von druckbaren Betonen im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit unter Feldbedingungen, ihr Automatisierungspotenzial, die Anschaulichkeit der gewonnenen Daten und ihre Effizienz bei der Vorhersage der Verbaubarkeit von gedruckten Betonstrukturen untersucht. Zu den untersuchten indirekten Methoden gehörten der CRV-Test, der einaxiale Druckversuch ohne Querdehnungsbehinderung (eng.: *unconfined uniaxial compression test*, UUCT), der schnelle

Penetrationstest und der neu vorgeschlagene einaxiale Druckversuch mit Querdehnungsbehinderung (engl.: *confined uniaxial compression test* (CUCT)). Alle Untersuchungen wurden an extrudierten Proben von acht druckbaren Betonmischungen mit verschiedenen Zusammensetzungen und rheologischen Eigenschaften durchgeführt. Die entsprechenden Ergebnisse wurden einander gegenübergestellt, um Korrelationen zwischen den Daten herzustellen und mit den Ergebnissen von direkten Verbaubarkeitstests (3D-Druck von hohlzylindrischen Strukturen) zu vergleichen.

Die entwickelte Methodik wurde außerdem zu einer eingehenden Untersuchung des Einflusses von Gesteinskörnungen auf den Strukturaufbau von herkömmlichem Beton genutzt. Dabei wurde die Bindemittelzusammensetzung konstant gehalten, während die Gesteinskörnung hinsichtlich des Volumenanteils und der Oberfläche (pro Volumeneinheit des Betons) variiert wurde. Der Schwerpunkt lag auf Zusammensetzungen mit einem erhöhten Gehalt an Gesteinskörnungen (45–55 Vol.-%). Ein Mechanismus, der hinter den Auswirkungen der Gesteinskörnungseigenschaften auf den Strukturaufbau von Beton steht, wurde durch die Untersuchung der Struktur von konstitutivem Zementleim in Beton entdeckt. Die durch Gesteinskörnungen induzierte Inhomogenität des konstitutiven Zementleims ermöglichte die Einführung eines Dreikomponentenmodells für Frischbeton. Zwecks Modellfindung zur Beschreibung und Vorhersage der statischen Fließgrenze und der Strukturaufbaurrate von Beton wurde dieser als eine Suspension von Gesteinskörnungspartikeln in einem Suspensionsmedium betrachtet. Drei Ansätze wurden verwendet, um die entsprechenden Komponenten zu definieren. Das Suspensionsmedium wurde durch extra hergestellten Zementleim, gesiebten Zementleim und Feinmörtel (inkl. Sandpartikeln unter 0,5 mm) abgebildet. Die Anwendbarkeit und die Grenzen der auf allen drei Ansätzen basierenden Modelle wurden verglichen. Der Modellierungsansatz wurde auf druckfähige Betone mit nahezu identischer Zusammensetzung der Gesteinskörnung, aber unterschiedlichen Eigenschaften des Zementleims erweitert. Möglichkeiten und Herausforderungen bei der Modellierung des Strukturaufbaus von druckbarem Beton wurden diskutiert, einschließlich der Problematik der Materialabhängigkeit der Modelle und der Relevanz der Anpassungskoeffizienten. Ein modifiziertes, auf der Definition des Suspensionsmediums als Feinmörtel basiertes Chateau-Ovarlez-Trung-Modell erwies sich zur Beschreibung des Strukturaufbaus sowohl von gewöhnlichem als auch von druckbarem Beton als am besten geeignet.

Abstract

Nowadays, construction industry is rapidly moving towards digitalization and automation that should enable increased rates and efficiency of construction processes, as well as higher possibilities for customization and architectural freedom. Among all technologies under development, digital fabrication with concrete by means of layered extrusion appears to be one of the most promising for purposes of fast mass housing construction. It enables formwork-free production of structures via layer-by-layer concrete printing. Freedom from formwork potentially makes the construction process more cost- and time-saving, but poses multiple challenges to mix design and test methods, especially in terms of concrete rheology. A special focus must be put on the structural build-up of concrete at rest, which is related to its buildability, i.e. capacity of the material to retain the shape of the extruded layers under their own weight and the weight of the subsequently placed layers.

This research investigates into the structural build-up of cementitious materials, i.e. evolution of their strength and deformation properties over time at rest, and includes development and refinement of methodology to assess the structural build-up, as well as its modelling and prediction.

With respect to methodology, major attention was directed to the constant rotational velocity (CRV) test used for evaluation of the static yield stress development, and rationalization of its application under field conditions. Based on a large amount of experiments performed with two rheometers of different design, characteristic curves and points describing patterns in behaviour of cementitious materials during a CRV test were established. The experimental study also dealt with assessing the effects of alterations in main elements of the CRV test protocol, such as test approach (single- versus multi-batch), pre-shear regime, applied CRV, on the test results. Possible errors in CRV tests were addressed and methods to improve the procedures of testing and data evaluation were suggested. In particular, the single-batch approach was enhanced by implementation of the developed breaking criterion, a concept of zero measurement for non-pre-sheared samples was introduced, and a method for simplified evaluation of elasticity by a single-head rheometer was proposed. General methodological recommendations on the design of a CRV test protocol were formulated. The results are applicable for various cementitious materials and not limited to concretes for layered extrusion.

Furthermore, test methods for assessing the structural build-up of printable concretes were studied in terms of their applicability under field conditions, potential for automation, descriptiveness of obtained data and efficiency in predicting the buildability of printed concrete structures. The methods under investigation included CRV test, unconfined uniaxial compression test (UUCT), fast penetration test and newly proposed confined uniaxial compression test (CUCT); all tests were performed on extruded samples of eight printable concrete mixtures with various compositions and rheological properties. The corresponding results were juxtaposed in order to establish correlations between the data and compared to the results of buildability tests, in which hollow cylindrical structures were produced using a laboratory-scale 3D printer.

The developed methodology was further used to conduct an in-depth investigation into the influence of aggregates on the structural build-up of ordinary concrete. In the experimental program, the binder composition was kept constant while the aggregate was varied in terms of the volume fraction and the surface area (per unit volume of concrete); the main focus was put on compositions with elevated aggregate content (45–55 % by volume). A mechanism lying behind the effects of the aggregate properties on the structural build-up of concrete was discovered by studying the structure of constitutive paste in concrete. Aggregate-induced inhomogeneity of constitutive paste allowed to introduce a three-component model of fresh concrete. Furthermore, to find models capable of predicting the parameters of structural build-up of concrete, i.e. static yield stress and structuration rate, concrete was viewed as a suspension of aggregate particles in suspending medium. Three approaches were employed to define the correspondent components. Suspending medium was represented by plain cement paste, screened cement paste and fine mortar considered as a part of concrete comprising particles below 0.5 mm; a substantiation for such a definition was provided. Applicability and limitations of the models based on all three approaches were compared. The modelling approach was further extended to printable concretes with nearly identical aggregate compositions, but different properties of paste. Opportunities and challenges in modelling the structural build-up of printable concrete, including the problem of material dependency of the models and the relevancy of fitting coefficients, were discussed. A modified Chateau-Ovarlez-Trung model based on the definition of suspending medium as fine mortar was acknowledged as best suited to describe the structural build-up of both ordinary and printable concrete.