

Flow-Induced Particle Migration in Concrete under High Shear Rates

Strömungsinduzierte Partikelmigration im Beton bei hohen
Scherraten

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

eingereichte

DISSERTATION

Vorgelegt von

Shirin FATAEI, M. Sc.

aus Mashhad (Iran)

eingereicht am 25. October 2021

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Viktor MECHTCHERINE

Prof. Dr. Nicolas ROUSSEL (Gustave Eiffel University)

Prof. Dr.-Ing. Michael HAIST (Leibniz Universität Hannover)

Abstract

The correlation between concrete rheological parameters and its pumping behavior under consideration of the so-called lubricating layer has been investigated for decades. In this thesis, flow-induced particle migration (FIPM) was studied in-depth, as the main underlying mechanism for the formation of the lubricating layer.

In addition to conventionally vibrated and self-compacting concretes, cementitious model concretes, containing colored glass beads, were used to obtain further insights into the FIPM and its impact on pumping. The mixtures varied with regard to particle volume fractions, mortars composition, maximum particle size and particle size distributions. In the experiments, various established methods were used to characterize the rheological properties and the pumping behavior of the concretes. Furthermore, new methodologies for estimating the thickness of the lubricating layer and the particle distribution in pumped cross-sections were proposed.

The rheological properties and pumping behavior of real and model concretes were in agreement with the state-of-the-art literature. Based on the radial particle distributions, it was illustrated that the particle migration intensifies with increasing size and decreasing total volume fraction of solid particles. Furthermore, in highly-concentrated poly-dispersed model concretes, the particle concentration curves show a sudden jump close to the pipe wall but a relatively uniform distribution in the inner zone of the pipe. Obviously, the influence of FIPM on overall flow behavior cannot be neglected in such cases. Moreover, it was shown that the lubricating layer thickness is **not** constant for all concrete mixtures. For poly-dispersed suspensions, the shear-induced particle migration (SIPM) has a stronger impact than the wall with respect to forming the lubricating layer. Finally, it was concluded that a solid-liquid threshold of 1 to 2 mm is a reliable choice when investigating concrete pipe flow. The faster the concrete is pumped or the lower the yield stress of the constitutive mortar is, the smaller is the size of solid particles representing the solid-liquid threshold.

Based on the experimental findings, a first-order physical correlation between pumping parameters (pressure and discharge rate), particle properties (volume fraction and packing density) and lubricating layer properties (thickness and viscosity) was proposed. Accordingly, for a simple flow topology with a shearing lubricating layer and an extruding yield stress concrete, the lubricating layer thickness was computed from the competition between shear-induced fluxes of particles. In agreement with the driving equations of SIPM, it was assumed that the first flux correlates with the internal stress gradient in the plug concrete whereas the counteracting particle flux correlates with the shear rate in the lubricating layer. The model was validated for

two flow types, pipe flow in the Sliper and Couette flow in a co-axial tribometer. The proposed model can capture the observed main features and their evolutions despite the absence of any fitting parameters.

Kurzfassung

Der Zusammenhang zwischen den rheologischen Eigenschaften von Beton und seinem Pumpverhalten wird seit Jahrzehnten unter besonderer Berücksichtigung der sogenannten Gleitschicht untersucht. In dieser Arbeit wurde die strömungsinduzierte Partikelmigration (FIPM) als Hauptmechanismus für die Ausbildung der Gleitschicht erforscht.

Die Untersuchungen fanden an Normalbetonen und selbstverdichtenden Betonen statt. Zusätzlich wurden Modellbetone, die farbige Glaskugeln als Komponenten der Gesteinskörnung enthielten, betrachtet, um ein tieferes Verständnis der FIPM und ihres Einflusses auf das Pumpverhalten zu erlangen. Die Betonzusammensetzungen unterschieden sich hinsichtlich der Volumenanteile der Partikel, der Mörtelzusammensetzung, der maximalen Partikelgröße und der Partikelgrößenverteilungen. In den Experimenten wurden verschiedene eingeführte Verfahren zur Charakterisierung der rheologischen Eigenschaften sowie des Pumpverhaltens der Betone eingesetzt. Außerdem wurden neue Methoden zur Schätzung der Gleitschichtdicke und der Partikelverteilung in den gepumpten Querschnitten vorgeschlagen.

Die rheologischen Eigenschaften und das Pumpverhalten von Normal- und Modellbetonen entsprachen dem aktuellen Stand der Literatur. Die Ergebnisse zu den radialen Partikelverteilungen in Pumprohren zeigten, dass die Partikelmigration durch die Erhöhung der Partikelgröße und die Verringerung der Volumenanteile der Partikel verstärkt wird. Bei hochkonzentrierten polydispersen Modellbetonen zeigen die Partikelkonzentrationskurven einen Sprung und deutlich weniger Werte in der Nähe der Rohrwand gegenüber einer relativ gleichmäßigen Partikelverteilung im Innenbereich des Rohres. In diesen Fällen kann der Einfluss der FIPM auf Strömungsverhalten im Pumprohr nicht vernachlässigt werden. Es wurde auch gezeigt, dass die Gleitschichtdicke aller Betonmischungen nicht konstant ist. Bei polydispersen Suspensionen hat die scherinduzierte Partikelmigration (SIPM) einen stärkeren Einfluss als die Rohrwand auf die Bildung der Gleitschicht. Schließlich wurde festgestellt, dass ein Fest-Flüssig-Grenzwert von 1 bis 2 mm eine geeignete Wahl für die Untersuchung von Rohrströmungen ist.

Auf Grundlage der experimentellen Ergebnisse wurde ein physikalisches Modell erster Ordnung entwickelt, welches Pumpenparameter (Pumpdruck, Fördermenge), Partikeleigenschaften (Volumenanteil, Packungseigenschaften) und Gleitschichteigenschaften (Dicke, Viskosität) verknüpft. Mit diesem Modell wurde für eine vereinfachte Strömungstopologie, die aus einer scherenden Gleitschicht und einem

ungeschierten Betonpfropfen besteht, die Gleitschichtdicke aus dem Vergleich zwischen scherinduzierten Partikelströmen berechnet. Den Grundlagen der SIPM zufolge wurde angenommen, dass der erste Fluss mit dem Eigenspannungsgradienten im Betonpfropfen korreliert, während der entgegenwirkende Partikelstrom mit der Schergeschwindigkeit in der Gleitschicht in Beziehung steht. Das Modell wurde für zwei Strömungsarten validiert: die Rohrströmung im Sliper und die Couetteströmung in einem coaxialen Tribometer. Das vorgeschlagene Modell ist in der Lage, die beobachteten Strömungseigenschaften des Betons und deren Entwicklungen mit verschiedenen Pumpenparametern und Partikeleigenschaften trotz fehlender Anpassungsparameter zu beschreiben.