

学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 <small>(Dissertation Title)</small>	A Study on Numerical Analysis Method for Flow of Fresh Concrete in Pipes
氏 名 (Name)	Xu Zhisong

Pumping has become the most widely used method to transport concrete for placement. The requirement for concrete pumping technology has been increasing due to the increase of large-scale construction projects such as high-rise buildings, long-span bridges, and others. Correspondingly, pumping construction has gradually become a difficult and challenging work. With the development and use of various chemical and mineral admixtures, the rheological performance of fresh concrete exhibits complexity and diversity. The experience and the guidelines of concrete pumping based on conventional concrete may be no longer applicable to new types of concrete. Thus, the development of prediction method of concrete pumping has been becoming a crucial issue for the concrete industry.

Although a few experimental devices such as sliding pipe rheometer have been proposed to predict pumping pressure required for concrete flow, besides the pumping pressure, other concern about pumped fresh concrete is the segregation, i.e., the separation of aggregate from cement paste or matrix mortar. When pumping, it is considered that large particles, such as coarse aggregate and larger sand particles, undergo the shear-induced migration towards the inner, forming a slip layer (also referred to as lubrication layer) near the pipe wall. Also, in front of the concrete, the concentration of coarse aggregate is high, which may form a plug of coarse aggregates to lead to the pipe blockage. Thus, the segregation prediction of pumped concrete is also an important issue.

Dynamic segregation and slip layer play a dominant role during pumping. However, the test methods commonly used to measure the consistency of fresh concrete, such as slump test, cannot encapsulate the effects of segregation and slip layer, and has been proved to not be relevant to the pumpability of concrete. Therefore, it is urgent to develop a new method for evaluating and predicting the pumpability of fresh concrete.

Pumping experiment is possible to confirm the pumpability of fresh concrete. However, numerical flow simulation is thought to be a rapid, inexpensive, and time & labor-saving method. Among the existing numerical methods, meshless particle methods, such as SPH and MPS, are suitable to pipe flow of fresh concrete. Since the interaction between particles can be well considered in particle methods, they have the potential to simulate heterogeneous properties of concrete and provide information about the dynamic segregation of concrete in pipe.

As a fundamental study of numerical analysis method of concrete pumping, this research aims to develop a numerical pipe flow approach based on the particle method to predict the flow & segregation behaviors of fresh concrete in pipe.

The original MPS method was improved to have complete implicit algorithms to simulate the flow of fresh concrete with high efficiency. The calculation efficiency and the applicability of weakly compressible SPH (WCSPH) and complete implicit MPS (I-MPS) approaches to the flow simulation of freshly mixed cementitious materials (FCM) were discussed. By comparing the numerical and experimental results of L-flow of fresh mortars, it is found that the WCSPH method would be suitable for flow simulation of fresh cementitious materials have low fluidity or they are subjected to low pressure, whereas the I-MPS method is of a wide application, especially for the fresh cementitious materials with high fluidity or subjected to a high pressure.

Then, the I-MPS method was further improved to have the ability to calculate two-phases flow problems, considering the differences in particle size, density, and interaction of different sorts of particle. A new constituent model, called Double-phase & multi-particle (DPMP) model, was proposed and incorporated into the I-MPS to establish a numerical flow & segregation model for fresh concrete. It was verified that the flow & segregation model can simulate the segregation behavior of coarse aggregate in fresh concrete together with fresh concrete's flow behavior. Both the static and dynamic segregation behaviors of fresh concrete were investigated numerically.

(和文 2,000 字程度 / 英文 800 語程度)
 (about 800 words)

and the author found that the smaller the yield stress of the matrix mortar, the easier it is for the coarse aggregate to segregate. Low plastic viscosity of matrix mortar, large size of coarse aggregate, and large difference of flow speed between coarse aggregate and matrix mortar will result in an increase in the segregation velocity of coarse aggregate.

A macroscopic approach was used to describe the slip layer in pipe flow. This macroscopic approach can not only avoid the assumption of the composition and thickness of slip layer, but also simplify the numerical model and thus raise the calculation efficiency of numerical simulation. Then, based on this macroscopic approach of slip layer, the pressure-pipe flow rate relationship was clarified by theoretical investigation. Finally, a new numerical method of concrete's pipe flow was developed based on the flow & segregation model, the slip layer model, and the I-MPS method, and was used to predict the pumping pressure of concrete, and to simulate the flow & segregation behaviors of fresh concrete in the pipeline, including particle velocity distribution, pressure distribution, deformation distribution, and coarse aggregate distribution, etc. By comparing the numerical and theoretical results, the numerical pipe flow method developed in this study was verified.

(様式 9 号)

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	Xu Zhisong 徐 支松
審査委員	主 査：李 柱国
	副 査：朝位 孝二
	副 査：佐伯 隆
	副 査：中村 秀明
	副 査：山田 和彦
論文題目	A Study on Numerical Analysis Method for Flow of Fresh Concrete in Pipes (フレッシュコンクリートの管内流動に関する数値解析方法の研究)
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>建設現場における労働力の削減、工期の短縮、経費の節約および品質の向上などのため、コンクリート工事の合理化が求められている。現在、ポンプ工法がコンクリート工事に広く普及しており、工期の短縮および省力化に多大な効果を発揮している。しかし、経験則で支えられているポンプ施工は、フレッシュコンクリート(FC)の流動性不足や管路閉塞などによる圧送トラブルや圧送後の性能低下が多発している。そのため、コンクリート構造物の高層化や大型化、品質向上の要求が高まる中で、より高度なポンプ技術が求められている。また、新型混和剤の開発とその使用により FC の性質は複雑化、多様化しており、従来のコンクリートのポンプ施工で蓄積された経験則は、新しいタイプのコンクリートには適用し難い。</p> <p>コンクリートが圧送管内を流動する際には、粗骨材粒子は圧送管の中心部や流動の先端部に移動する傾向があるため、潤滑層が圧送管の内壁付近に形成され、流動の先端部では閉塞が発生しがちである。したがって、ポンプ圧送の高度と距離の他、FC の流動性、材料分離抵抗性や潤滑層の形成の容易さがポンプ圧送性の主な影響要因となる。コンクリートのポンプ圧送性を正確に評価・予測するためには、FC 自身の性質、ポンプ能力および圧送の高さと距離を総合的に考慮することが必要である。特に、圧送時の管内閉塞を防止するためには、粗骨材分離の予測技術の開発は急務な課題である。実規模の施工実験を行うポンプ圧送性の評価法は、膨大な費用と時間がかかり、高所までの圧送性を確認できず、圧送流動の際に生じる材料分離挙動を評価し難い。そこで、数値流動シミュレーションによる評価と予測技術が望まれている。従来の SPH, MPS などの粒子法は、FC の流動解析に適用可能であるが、均一な球状粒子を用いて材料や流体を表現するため、そのままでは FC の材料分離を予測することができない。</p> <p>上記の研究背景を踏まえ、本研究では、粒子法の改良を行い、FC の数値モデルを提案した上で、FC の流動と分離挙動を同時に予測し、潤滑層を取り扱う管内流動の数値解析方法を開発した。本論文は全 6 章の構成であり、各章の内容は以下のとおりである。</p>	

(様式 9 号)

第 1 章では、本研究の背景を述べると共に、本研究の目的および本論文の構成を記述している。第 2 章では、本研究と関連する既往研究をレビューした上で、研究の現状と問題点をまとめた。第 3 章では、管内の FC の加圧流動解析に適した粒子法を検討した。従来の MPS 法は、半陰的なアルゴリズムを用いるため、粘度が高い流体の場合に計算効率が低い。FC の流動解析の効率を高めるために、完全な陰的なアルゴリズムを用いた MPS(I-MPS と略称)を開発した。次に、I-MPS と弱圧縮 SPH 法(WCSPH と略称)でフレッシュモルタルの L-フロ試験をそれぞれシミュレートし、計算結果と試験結果を比較することにより両解析方法の精度と影響要因を検討した。I-MPS は高い計算効率と精度を有しており、高圧下での流動解析に適用することを明らかにした。

第 4 章では、I-MPS に基づいて、FC の粗骨材の分離挙動を予測する数値方法を開発した。FC は、粗骨材とモルタルからなる二相材料と見なされ、粗骨材は、任意の形状と大きさを有するように小さな球状の元素粒子で構成され、その密度は球状のモルタル粒子とは異なる。次に、元素粒子からなる粗骨材粒子の変位の計算方法を検討し、粗骨材粒子間および粗骨材粒子とモルタル粒子の間の作用力を計算する方法と、粗骨材粒子の分離程度による FC のレオロジー定数を推定する方法を提案し、FC の粗骨材分離挙動を評価可能な数値解析モデル(DPMP モデルと略称)を開発した。さらに、高流動コンクリートの L-フロー試験に対して解析を行い、静的分離と動的分離挙動をシミュレートして、DPMP モデルの妥当性を検証した。

第 5 章では、フレッシュコンクリートの管内流動の数値解析方法を開発した。まず、粒子法解析の場合に適する管壁付近の潤滑層の取扱方法を検討した。次に、潤滑層のマクロなアプローチに基づいて管内流動の理論的考察により圧力と流量の関係を明らかにした。また、DPMP モデル、潤滑層のすべり抵抗モデルおよび I-MPS に基づいて、FC の管内流動の圧力、流動・分離挙動を予測する数値解析手法を開発した。さらに、FC の管内流動シミュレーションを行い、数値解析結果と理論計算結果の比較により本手法の妥当性を検証した。

第 6 章では、本研究で得られる知見をまとめ、今後の課題を述べた。

公聴会では、学内外から 17 名の参加があった。数値計算結果への粒子寸法の影響、開発した数値方法の管径変化時への適用性および FC の水分離をはじめとする各種性能予測への適用性と応用展望などの質問があった。いずれの質問に対しても発表者から適切な回答がなされた。

以上より、本研究は新規性、信頼性および学術性が優れ、博士(工学)の論文に十分値するものと判断した。論文内容及び審査会、公聴会での質疑に関する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記の通りである (3 編)。

- (1) Z. Xu, Z. Li, F. Jiang: The Applicability of SPH and MPS Methods to Numerical Flow Simulation of Fresh Cementitious Materials, *Construction and Building Materials*, Vol. 274, pp. 121736, 2021 (SCI 収録, IF=4.419)
- (2) Z. Xu, Z. Li, G. Cao, F. Jiang: Comparison of SPH and MPS Methods for Numerical Flow Simulations of Fresh Mortar, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 41, pp. 1127-1132, 2019.7
- (3) Z. Li, Z. Xu, F. Jiang, R. Yoshioka: Flow Simulation of Fresh Concrete Using SPH Method with Consideration of Geometry of Particles, *Proc. of 6th International Conference on Construction Materials (ConMat' 20)*, Fukuoka, Japan, 2020.8 (in CD, No. 1-4-19)