

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

学位論文題目	Numerical Study on the Time-dependent Flow Behaviors of Fresh Concrete
氏 名	CAO Guodong

Concrete is one of the most widely used construction materials. The performances of hardened concrete is greatly dependent on the construction quality. Pump is widely used to transport concrete in construction site, and maximum pumping distance and height become greater and greater as high-rise buildings increase. And the amount of reinforcing steel bars in concrete member has been increased for achieving earthquake-resistant structure. Therefore, proper evaluation and prediction of the workability of fresh concrete, including flow ability, segregation resistance, and passing ability, etc., are essential to consider the structural, construction and environmental conditions. Numerical simulation is thought to be a rapid, inexpensive, and time & labor saving method for workability design.

Fresh concrete is a kind of viscous particle material that contains water, cement and aggregate particles. Interactions among the particles may lead to inter-particle structure at rest, which are physical flocculation and cement hydration. The physical flocculation originates from a combined action of van der Waals attraction, electrostatic repulsion and steric hindrance, is a reversible process. The flocculated structure would be broken down by an agitation. When the hydrates are generated, there are linkages formed between particles. Since these linking structures are not easily destroyed by an external force, the formation of hydrate-linkage structure is an irreversible process. With the advance of degrees of cement hydration and physical flocculation, the flow ability of fresh concrete drops, i.e. shows standing time-dependent behavior.

Except for physical flocculation and cement hydration, the particle arrangement, which is usually described by the distribution and mean value of particle contact angles, also affects the rheological properties of fresh concrete. The movement of particles under external force or own weight causes a change in the particle arrangement of fresh concrete. Hence, the flow behavior of fresh concrete is shearing time-dependent. Moreover, particle contact results in inter-particle frictional resistance that is dependent on the vertical pressure or normal stress on the shear plane. Therefore, fresh concrete's flow behaviors are not only shearing time-dependent but also vertical pressure-dependent.

Up till now fresh concrete is usually regarded as a viscous fluid, and the Bingham model is used as its constitutive model in the numerical flow simulation. But Bingham model is unable to describe the time-dependence, and pressure-dependence of flow behaviors. The standing and shearing time-dependences of fresh concrete are barely reflected in the numerical simulation.

This research aims to develop analytical methods for the time-dependent flow behaviors of fresh concrete. Fresh concrete is a kind of particle material as stated above, and its flow is a large deformation problem. Thus two particle methods were used in this study to simulate the flow behaviors of fresh concrete. First, a standing time-dependent Discrete Element Method (td-DEM) was proposed to investigate the standing time-dependence of fresh concrete. The td-DEM is a mesh free particle method and can directly express the contact model and describe the contact action change between particles. The parallel contact model was adopted to describe the contacts between the physically flocculated particles, and the standing time-dependent stiffnesses of the parallel contact model were obtained by theoretical investigation. The effect of cement hydration was considered in the td-DEM by introducing the clumped particles that are particle group linked by the hydrates. In this td-DEM, the effects of cement's fineness and constitutes and the addition of mineral admixtures were also considered. For verifying this new td-DEM, the numerical simulation of the gravity-induced funnel flow of fresh mortar was

performed. The numerical and experimental results at different standing time after mixing were well consistent.

Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) is also a mesh free particle method. Large deformation problem of free surfaces, such as flow of fresh concrete, can be easily and accurately tracked by the Lagrangian motion of particles. A numerical approach was proposed to investigate the shearing time-dependence of fresh concrete, on the basis of SPH and VGM (viscous granular material) model. The VGM model is a newly developed constitutive model, which can describe the nonlinear, shearing time-dependent, and pressure-dependent flow behaviors of fresh concrete. And the visco-plastic model, proposed by Murata, was adopted to treat the slippage resistance of fresh concrete at the flow boundary in this SPH. L-flow tests of three types of fresh mortar with different water cement ratio were simulated by using the proposed SPH. In order to discuss the effect of using different constitutive models, the numerical simulations using SPH and Bingham model were also performed for the mortar mixtures. It was found that the numerical results using VGM model were more consistent with the experimental ones than the Bingham model for low fluidity mixture since the VGM model can reflect the change of internal structure of fresh concrete during the flow process.

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

(博士後期課程博士用)

山口大学大学院理工学研究科

報告番号	理工博甲 第 749 号	氏名	曹国棟
最終試験担当者	主査	李柱国	
	審査委員	中村秀明	
	審査委員	藤田正則	
	審査委員	佐伯隆	
	審査委員	高海克彦	
【論文題目】 Numerical Study on the Time-dependent Flow Behaviors of Fresh Concrete フレッシュコンクリートの流動挙動の時間依存性に関する解析的研究			
【論文審査の結果及び最終試験の結果】 フレッシュコンクリート(FC)は、セメントの水和反応および微小な粒子の物理凝集によって時間経過とともに流動性が低下する。いわゆるスランプロス現象である。この特性は、FCの流動性の静置時間依存性と称される。運搬時間が長くなる場合または現場では打設の待機時間が長い場合、スランプロスは大きく生じ、生コンクリートが使用できなくなり、ポンプの閉塞や配管破損の主要因となる。また、FCの施工性の評価と設計は、打設部位の構造条件、施工方法および環境条件を考慮しなければならない。数値流動シミュレーションに基づく施工性の評価・設計法は、これらの多岐な要因を考慮でき、時間と労力を節約し、安価な方法であると考えられる。精確な数値流動シミュレーションを行うために、合理的なFCの力学構成則、即ちレオロジーモデルを用いることは重要である。しかし、従来の数値流動解析のほとんどはビンガムモデルを用いており、解析結果はFCの流動の実現象と一致しているとはいえない。その理由として、ビンガムモデルは、その定数(降伏値と塑性粘度)が不変量であるため、FCの流動挙動のせん断持続時間依存性を表現できない。 上記の背景を踏まえ、本研究ではFCの性能変化の予測方法および精確な流動シミュレーション方法を開発した。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。 第1章「Introduction」では、FCの特性を説明し、数値流動解析に基づいたFCの施工性の評価と最適化を行う際に静置時間依存性とせん断時間依存性を考慮する必要性を述べるとともに、技術の現状と問題点を整理しており、本研究の目的を明らかにしている。 第2章「Review of Previous Research」では、FCの性能予測と数値解析に用いたレオロジーモデルおよび数値解析方法を中心にレビューしている。既往研究のレビューを通じて、本研究の位置づけと課題を明確にしている。			

第3章「Experiments」では、フレッシュコンクリートの代わりにフレッシュモルタルを実験に使用する理由を述べた上で、フレッシュモルタルのロート流下試験を行い、流下質量と流下時間の関係に及ぼす静置時間の影響を考察し、フライアッシュと高炉スラグ微粉末の添加有無の違いを検討した。また、リングせん断試験機を用いてフレッシュモルタルのレオロジー的性質（粘性粒状体材料モデル(VGM)の定数)を測定し、Lフロー試験を行った。

第4章「Standing time-dependent DEM」では、静置時間依存性のメカニズムを分析し、セメントの水和反応生成物による結合粒子数および物理的凝集粒子数をそれぞれ理論的に考察し、温度と混和材の影響を定量化した。さらに、粒子間の相互作用モデルを提案した。結合粒子の導入および凝集粒子の相互作用モデルの定数を経過時間と共に変化させることによって、FCの静置時間依存性を予測する個別要素法(td-DEM)を開発した。td-DEMを用いて、前述したモルタルのロート流下試験をシミュレートし、試験結果と比較してDEMの妥当性を検証し、なおかつ混和材を使用した場合にも適用できることを明らかにした。

第5章「Shearing time-dependent SPH Approach」では、FCのせん断持続時間依存性を表現できるレオロジーモデル(VGMモデル)に基づいて大変形解析に適用可能なSmoothed Particle Hydrodynamic法(SPH)を開発した。さらに、3章の実験で測定したVGMモデルの定数を用いて前述したフレッシュモルタルのLフロー試験をシミュレートし、実験結果と比較してSPH法の精度と適用範囲を明らかにした。

第6章「Conclusions and Future Works」では、本研究で得られた結果をまとめるとともに、今後の課題を述べた。

公聴会では、学内外から19名の参加があった。主な質問は、粗骨材がある場合の境界抵抗の扱い方、流動性が高い試料の見かけ降伏値の解析結果はせん断時間に伴って変化しない理由、せん断破壊限界応力の決定方法、リングせん断試験機によるレオロジー試験に用いた試料の厚さ、二つの解析方法(DEMとSPH)の選定理由、SPHの計算式にFCの構成モデルの導入方法などであった。いずれの質問に対しても発表者から回答がなされた。

以上より、本研究は独創性、信頼性、学術性および実用性が優れ、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、最終試験を合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記の通りである(関連論文:3編、参考論文:3編)。

【関連論文】

1. G. Cao, Z. Li, Numerical flow simulation of fresh concrete with viscous granular material model and smoothed particle hydrodynamics, *Cement and Concrete Research*, Vol.100, 2017, 263-274. (2016 IF: 4.762)
2. Z. Li, G. Cao, Y. Tan, Prediction of time-dependent flow behaviors of fresh concrete, *Construction and Building Materials*, Vol.125, 2016, 510-519. (2016 IF: 3.169)
3. G. Cao, Z. Li, K. Guo, Analytical study on the change of fluidity of fresh concrete containing mineral admixture with rest time, *Journal of Advanced Concrete Technology*. Vol.15, 2017, 713-723 (2016 IF: 0.835)