

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	鉄筋と振動条件を考慮したフレッシュコンクリートの流動・分離挙動の数値解析方法
氏 名(Name)	陳 偉
鉄筋コンクリート（RC）構造は，建築および土木分野において最も広く使用されている構造形式の一つである。近年では，高層建築物や長大橋梁などの大規模構造物の建設と耐震構造の実現に伴い，RC部材の形状は一層複雑化し，鉄筋配置も高密度化している。こうした条件下では，コンクリートの打設が困難となり，充填不良や材料分離，さらには豆板や鉄筋露出といった施工上の問題が頻繁に発生している。 一方で，化学混和剤の高度化に加え，産業副産物や再生材料によるセメントおよび骨材の代替利用が拡大したことにより，フレッシュコンクリートの性状は一層複雑かつ多様化している。これに対し，従来の普通コンクリートを対象として構築されたポンプ圧送や打設などに関する経験則や施工規準は，新しいコンクリートの施工には十分に対応できない場合が多い。特に，低・中流動性コンクリートの振動打設では，振動はコンクリートのレオロジー特性を変化させ，その挙動はコンクリート自身の材料特性，鉄筋の配置，振動機の特性に大きく依存する。また，振動は骨材の分離を助長し，硬化後コンクリートの力学性能や耐久性能の低下を招くおそれがある。そのため，振動下におけるフレッシュコンクリートの流動および分離挙動を定量的に把握し，適切な振動条件を設定することが重要である。 このような背景のもと，数値解析はフレッシュコンクリートの施工性能を評価・最適化するための有効な手法として注目されている。数値解析は，実大施工実験に比べて効率性が高く，コストや人員の削減が可能なのであるだけでなく，コンクリートの型枠内における流動，分離，充填過程を可視化できるという利点を有する。材料特性，構造条件，施工条件を数値解析モデルに入力することで，打設時の流動および充填挙動をシミュレートし，合理的な調合や施工条件の最適化を図ることが可能となる。 以上を踏まえ，本論文では，鉄筋コンクリート部材の打設過程におけるフレッシュコンクリートの流動および分離挙動を再現可能な数値解析手法の構築を目的としている。従来の経験則に依存しないコンクリートの設計および施工管理手法の確立を目指す。 第1章では，本研究の背景，目的，および論文構成について述べる。 第2章では，フレッシュコンクリートのレオロジー特性と数値解析手法，軽量骨材コンクリートの流動および分離挙動，ならびに振動がフレッシュコンクリートに及ぼす影響に関する既往研究を整理・概説する。また，これらの研究において未だ解決されていない課題を整理し，本研究の位置付けを明確にする。 第3章では，安全陰解アルゴリズムを備えた粒子法（Complete Implicit MPS、I-MPS 法と略称）と固液二相流体の MPS 法に基づいて，鉄筋の影響を考慮した新たな数値解析手法（I-MPS/DPMP/RB 法と記する）を提案し，軽量粗骨材を用いた RC 部材の無振動打設過程における	

フレッシュコンクリートの流動および分離挙動を試みた。本手法では、従来のように鉄筋を単なる静的な境界として扱うのではなく、コンクリートが鉄筋間隙を通過する際に受ける抵抗を、①実物障害、②鉄筋表面のすべり抵抗、③鉄筋間隙における流動の拘束効果の三要素に分けて個別にモデル化した。実物障害については、鉄筋を境界粒子として表現し、すべり抵抗はすべり抵抗モデルを用いて再現した。さらに、鉄筋の拘束効果は、コンクリートに作用する垂直応力を増加させることで考慮した。垂直応力の影響を適切に再現するため、従来のビンガムモデルに代えて粘性粒状体材料 (VGM) モデルを採用した。また、骨材の分離挙動を表現するため、フレッシュコンクリートをマトリックスモルタルと粗骨材からなる二相流体と見なし、両者を 2 種類の近似球状粒子で表現した。I-MPS/DPMP/RB 法を、鉄筋を配置した L 字型ボックス内における軽量粗骨材コンクリートの無振動打設時の流動および分離挙動の解析に適用した結果、粗骨材体積率の予測誤差は 3% 以内であり、流動挙動も実験結果と良好に一致した。さらに、鉄筋を静的な境界として扱う従来手法と比較して、流動予測誤差を約半減できることが確認された。

第 4 章では、フレッシュコンクリートの流動および分離挙動に対する鉄筋および粗骨材形状の影響を同時に考慮するため、I-MPS/DPMP/RB 法をさらに改良し、I-MPS/DPMP/RB/AS 法として提案した。本手法では、形状が不規則な粗骨材粒子と球形のモルタル粒子によってフレッシュコンクリートを表現した。粗骨材、複数の基本粒子から構成される 6 種類の形状をもつ数値粒子としてモデル化し、実際の粒度分布および形状指標と整合させた。さらに、鉄筋を配置した L 型ボックスを用いて実験および数値流動解析を実施した結果、砕石を用いたフレッシュコンクリートにおいては、I-MPS/DPMP/RB 法と比較して、流動挙動で約 30%、分離挙動で約 20% の解析精度向上が確認された。一方、球形に近い人工軽量粗骨材を用いた場合には、流動および分離挙動の解析精度の向上は限定的であった。

第 5 章では、鉄筋の影響を考慮した振動打設時のコンクリートの充填および分離挙動を予測する数値解析手法を提案した。内部棒状振動機の振動減衰については、振動エネルギー拡散モデル (指数関数) を採用し、コンクリート固有の振動減衰に加えて、鉄筋による減衰効果を鉄筋体積率に基く減衰係数として導入した。また、粗骨材分離が発生する際のフレッシュコンクリートの限界降伏応力に基づき、振動締固め時における材料分離の発生位置を予測可能とした。さらに、鉄筋を配置した L 型ボックスを用いた振動打設実験を行い、解析手法の妥当性を検証するとともに、鉄筋間隔、棒状バイブレーターの特性、およびコンクリートの流動性が充填および分離挙動に及ぼす影響を考察した。その結果、充填形状の予測誤差は実験結果に対して 10% 以内であり、高い再現性が確認された。また、分離が生じる領域も可視化となり、解析結果に基づいて適切な振動時間および挿入間隔を合理的に決定できることが示された。

第 6 章では、本研究で得られた主要な成果を総括するとともに、今後の課題について述べた。

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	Numerical Approach to the Flow and Segregation Behavior of Fresh Concrete Considering Steel Bars and Vibration Conditions
氏 名 (Name)	CHEN WEI
Reinforced concrete (RC) is one of the most widely used construction materials due to its excellent mechanical performance, adaptability to various structural forms, and cost-effectiveness. With the development of large-scale structures such as high-rise buildings and long-span bridges, RC members have become increasingly complex in geometry, accompanied by denser reinforcement arrangements and narrower rebar spacing. These features significantly hinder concrete flow during casting, often causing filling blockage, segregation, and surface defects such as exposed reinforcement and honeycombing. Meanwhile, the extensive use of chemical and mineral admixtures, industrial by-products, and recycled materials has increased the complexity of the rheological behavior of fresh concrete. Traditional empirical methods and mix design guidelines developed for conventional concrete are often inadequate for evaluating the workability of modern concretes under complex reinforcement and construction conditions. For low- and medium-flowability concrete, vibration is commonly applied to enhance fluidity, expel entrapped air, and improve compaction. However, vibration significantly alters the rheological behavior of fresh concrete depending on concrete properties, reinforcement configuration, and vibrator characteristics, and may intensify aggregate segregation. Therefore, a quantitative understanding of the flow and segregation behavior of vibrated fresh concrete in reinforced regions is essential. In this context, numerical simulation has emerged as an efficient and powerful tool for evaluating the workability of fresh concrete. Compared with experimental approaches, numerical methods offer higher efficiency, lower cost, and full-field visualization of flow, segregation, and filling processes. By incorporating material properties, rheological parameters, and construction conditions into computational models, potential filling blockage and segregation risks can be predicted in advance, enabling optimized mixture design and construction planning. Given these challenges, this dissertation aims to develop a numerical analysis framework capable of simulating the flow and segregation behavior of reinforced concrete during casting and vibration, thereby contributing to a more predictive and rational approach to concrete design and construction management. In Chapter 1, the research background, objectives, and overall framework of this dissertation are presented. In Chapter 2, previous studies on numerical simulation methods for fresh concrete, rheological models, flow and segregation behaviors of lightweight aggregate concrete, and the effects of vibration on fresh concrete were reviewed. Moreover, the problems waiting to be resolved were summarized. In Chapter 3, a novel numerical method based on the moving particle semi-implicit (MPS) method is developed to simulate the flow and segregation behavior of fresh concrete during the casting of reinforced	

members. Unlike conventional approaches that treat reinforcement as static boundaries, the restraining effect of rebars on concrete flowing through narrow gaps is explicitly considered by increasing the normal stress acting on the concrete. To account for this effect, a viscous granular material (VGM) rheological model is adopted instead of the Bingham model. Fresh concrete is modeled as a two-phase fluid to describe aggregate segregation. The method is validated through simulations of lightweight aggregate concrete (LWAC) flow in an L-shaped box with rebars. The predicted aggregate volume fraction agrees with experimental results within a 3% error, and the accuracy of flow prediction is significantly improved. Compared with the static-boundary treatment of reinforcement, the proposed method reduces the error of concrete flow prediction by approximately half.

In Chapter 4, the numerical framework is extended to incorporate the influence of coarse aggregate shape on the flow and segregation behavior of fresh concrete. A shape index is proposed to quantitatively characterize aggregate geometry. In the simulation, fresh concrete is represented by irregular coarse aggregate particles and spherical mortar particles, with aggregate shapes reproduced using assemblies of elementary particles. Experimental and numerical investigations are conducted for two types of concrete cast in reinforced L-shaped molds. The results show that, for concrete containing poorly shaped crushed stone, the proposed method improves simulation accuracy by approximately 30% for flow behavior and 20% for segregation behavior compared with the method in Chapter 3. In contrast, only marginal improvement is observed for LWAC with nearly spherical artificial aggregates.

In Chapter 5, a numerical approach for simulating the filling and segregation behavior of reinforced concrete under vibration is proposed. Vibration attenuation from an internal poker vibrator is quantified using a vibration energy diffusion model, and the attenuation effect of reinforcement is incorporated through a damping coefficient determined by the reinforcement volume ratio and the intrinsic damping properties of the concrete. The method is validated using the L-Flow test, and the effects of rebar spacing, vibrator characteristics, and concrete fluidity on compaction efficiency are investigated. The simulation results show good agreement with experimental observations, with deviations in filling profiles within 10%. The proposed method enables visualization of segregation-prone zones and provides a rational basis for optimizing vibration duration and insertion spacing.

In Chapter 6, the main conclusions of this dissertation are summarized, the limitations of the present study are discussed, and future research directions are outlined.

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	Chen Wei (陳 偉)
審 査 委 員	主 査： 李 柱国
	副 査： 中村 秀明
	副 査： 吉武 勇
	副 査： 山田 悠二
	副 査： 秋山 知芳
論 文 題 目	Numerical Approach to the Flow and Segregation Behavior of Fresh Concrete Considering Steel Bars and Vibration Conditions (鉄筋と振動条件を考慮したフレッシュコンクリートの流動・分離挙動の数値解析方法)
【論文審査の結果及び最終試験の結果】 鉄筋コンクリート（RC）構造は、建築および土木分野において最も広く採用されている構造形式の一つである。近年、大規模構造物の建設や高い耐震性能の要求に伴い、RC 部材の形状は複雑化し、鉄筋配置も高密度化する傾向にある。このような条件下では、コンクリートの打設が困難となり、充填不良などの施工上の問題が発生しやすくなる。 一方で、化学混和剤の高度化や、再生材料を用いたセメント・骨材の代替利用が進んだことにより、フレッシュコンクリートの性状は従来よりも複雑かつ多様化している。しかし、現在広く用いられているポンプ圧送や打設に関する経験則や施工規準は、こうした新しい材料特性を十分に反映できない場合が多い。 このような背景から、材料特性、構造条件、施工条件を総合的に考慮できる数値解析は、フレッシュコンクリートの施工性能を評価・最適化するための有効な手法として注目されている。数値解析は、実大施工実験と比較して効率性が高く、コストや人員の削減にも寄与する。 本論文では、鉄筋コンクリート部材の打設過程におけるフレッシュコンクリートの流動および分離挙動を再現可能な数値解析手法の構築を目的とする。従来の経験則に依存しない施工性の最適化および施工計画手法の確立を目指すものである。 本論文は 6 章で構成されており、各章の概要は以下の通りである。 第 1 章では、本研究の背景、目的、および論文構成について述べた。 第 2 章では、フレッシュコンクリートのレオロジーモデルおよび数値解析手法に関する既往研究を整理するとともに、軽量骨材コンクリートにおける流動・分離挙動、さらに振動がフレッシュコンクリートのレオロジー特性に及ぼす影響に関する研究動向を概説した。また、これらの研究分野において依然として未解決の課題を整理し、本研究が位置づけられる学術的背景と必要性を明確にした。 第 3 章では、従来の MPS 法（Moving Particle Semi-implicit）を改良して得られた完全陰解法、およびフレッシュコンクリートの固液二相モデル（DPMP）に基づいて、鉄筋の影響を考慮した新たな数値解析手法を提案した。本手法では、従来のように鉄筋を単なる固定境界として扱うのではなく、コンクリートが鉄筋間隙を通過する際に受ける抵抗を、①実物阻害、②鉄筋表面のすべり抵抗、③鉄筋間隙における流動拘束効果の三つに分けてモデル化した。実物阻害については鉄筋を境界粒子として表現し、すべり抵抗はすべり抵抗モデルにより再現した。さらに、鉄筋の	

(様式 9 号)

拘束効果はコンクリートに作用する垂直応力を増加させることで考慮した。垂直応力の影響を適切に表現するため、ビンガムモデルに代えて粘性粒状体材料 (VGM) モデルを採用した。提案した解析手法を、鉄筋を配置した L 字型ボックス内における軽量粗骨材コンクリートの無振動打設時の流動および分離挙動の解析に適用した結果、粗骨材分布の予測誤差は 3% 以内であり、流動挙動も実験結果と良好に一致した。さらに、鉄筋を固定境界として扱う従来手法と比較して、流動予測誤差を約半減できることが確認された。

第 4 章では、フレッシュコンクリートの流動および分離挙動に対する鉄筋の影響に加えて、粗骨材形状の影響を考慮するため、第 3 章で構築した解析手法をさらに改良した。本手法では、形状が不規則な粗骨材粒子と球形のモルタル粒子によってフレッシュコンクリートを表現した。粗骨材については、複数の基本粒子から構成される 6 種類の形状をもつ数値粒子としてモデル化し、実際の粒度分布および形状指標と整合するように設定した。さらに、鉄筋を配置した L 型ボックスを用いて実験および数値解析を行い、砕石を用いたコンクリートの流動および分離挙動を検証した。その結果、第 3 章の手法と比較して、流動挙動の解析精度は約 30%、分離挙動の解析精度は約 20% 向上することが確認された。

第 5 章では、第 3 章で考慮した鉄筋の三つの影響に加え、振動打設時におけるコンクリート中の振動エネルギーの減衰が鉄筋によって増加する効果を新たに導入し、さらに粗骨材分離が発生する条件を組み込むことで、RC 施工における振動打設時の充填および分離挙動を予測する数値解析手法を提案した。さらに、鉄筋を配置した L 型ボックスを用いて振動打設実験を実施し、解析手法の妥当性を検証するとともに、鉄筋間隔、棒状振動機の特徴およびコンクリートの流動性が充填および分離挙動に及ぼす影響を考察した。その結果、充填挙動の予測誤差は実験値に対して 10% 以内であり、分離が生じる領域も可視化できた。これにより、解析結果に基づいて適切な振動時間および挿入間隔を合理的に決定できることが示された。

第 6 章では、本研究で得られた主要な成果を総括するとともに、今後の課題について述べた。

本研究の成果は、鉄筋コンクリート施工時において、鉄筋・粗骨材・振動の影響を統合的に考慮した充填および分離挙動の予測を可能にし、施工性の評価・設計および施工計画の立案に有効な解析ツールを提供するものであり、RC 構造物の施工品質向上に寄与すると考えられる。

なお、本審査申請時の論文題目は、「Numerical Approach to the Flow and Segregation Behavior of Fresh Concrete Considering Reinforcement and Vibration Conditions」であったが、本審査会での意見を受けて、「Numerical Approach to the Flow and Segregation Behavior of Fresh Concrete Considering Steel Bars and Vibration Conditions」に修正された。

対面とオンラインを併用して開催された公聴会には、学内外から 26 名が参加した。主な質問内容は、モルタルと粗骨材粒子の相互作用の扱い、鉄筋が存在する場合の振動減衰係数を計測する際の加速度センサーの設置位置、形状が異なる粗骨材粒子の数値的表現方法、およびコンクリート粒子が型枠 (境界) 外へ逸脱しないための扱いなどであった。発表者は、いずれの質問に対しても明確な回答を行った。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、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、公聴会での質問に対する応答などから、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。(2 編)

- ① Wei Chen, Zhuguo Li, Zhisong Xu: Development of new numerical approach to the flow and segregation behaviors of fresh concrete considering rebar restraint and its application in reinforced lightweight aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 439, 137202, Aug. 2024 (SCI 収録, 2024 年 IF: 7.4)
- ② Wei Chen, Zhuguo Li, and Caijun Shi: Numerical Analysis of Flow and Segregation of Self-Consolidating Concrete During Casting of Reinforced Elements, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 22, Issue 12, pp.735-750, Dec. 2024 (SCI 収録, 2024 年 IF: 2.2)