

# 粉体系高流動コンクリートの配合設計法とその性能に 関する実験的研究

徳 橋 一 樹

## 要 旨

現在、コンクリート構造物に要求される性能は益々複雑かつ多様化してきており、それに対応するために構造物の長寿命化や高耐久性化、施工の合理化を目的とした高流動化、維持管理コストやライフサイクルコストの削減などコンクリートの高性能化を図ることが強く望まれている。また、これからの建設事業の発展を考えると、高性能化したコンクリートを一般的なものとして積極的に使っていかなければならない状況にあるといえ、コンクリートの高性能化を図るための研究や技術開発が極めて重要であると考えられる。

特に近年、鉄筋コンクリート工事に携わる技能労働者の減少や高齢化が進み、工事の工程や竣工した建築物の品質に重大な影響を及ぼすようになってきている。そして、コンクリート構造物の早期劣化の原因は、主に人手に頼るコンクリートの打込みと締固めの不良にあるの認識から、これらのコンクリート工事を合理的に実施して行くためには、施工の省力化および自動化が必須条件とされ、そのために施工性の良い流動性の高いコンクリートに対する要望が強くなってきた。

そのような社会的状況のもと、「打込み時に締固め作業が不要な自己充てんコンクリート」の概念が提唱され、1988年に世界で初めて我が国においてが開発された。その後、多くの研究機関においてさらなる研究・開発が進められた。1998年には、土木学会より「高流動コンクリート施工指針」が出版されるに至り、既に実構造物にも使用されている。土木学会「高流動コンクリート施工指針」の中で、高流動コンクリートとは、一般に「フレッシュ時の材料分離抵抗性を損なうことなく流動性を高めたコンクリートである。」と定義されている。通常、粉体系高流動コンクリートの適度な材料分離抵抗性（粘性）は鉱物質微粉末などの粉体材料により付与され、その極めて高い流動性は高性能 AE 減水剤や高性能減水剤により発揮されることとなる。しかしながら、このように多種多様な材料を用い製造され、その組み合わせも複雑である高流動コンクリートの配合設計は、必ずしも合理的な手法が確立されているとは考えないのが現状である。さらに、現状の指針では、自己充てん性を得ることに配合設計の主眼がおかれており、耐久設計の概念は取り入れられていない。高流動コンクリートは、通常のコンクリートよりも粘性が増加することが報告されており、特に練混ぜ時に粗い気泡組織が形成され易く、硬化コンクリートの耐久性への悪影響が懸念される。

一方、近年良質なコンクリート用骨材の入手が次第に困難になりつつあり、また産業副産物などを新たな資源として積極的に利用することが強く要請されて来ている。このような社会情勢を考慮すると、今後は、これまで高流動コンクリートへの使用実績が低い砕砂や金属精錬スラグ細骨材などを有効に利用していかなければならない現状にあると言え、このような材料を土木構造物の施工

---

学位記番号と学位：第 15 号，博士（工学）  
授与年月日：平成 14 年 3 月 20 日  
授与時の所属：大学院工学研究科土木工学専攻博士後期課程

に使用する機会は今後益々増加すると予想される。

このような社会的背景に鑑み本研究は、産業副産物も含めた原材、製造方法及び物性の異なる、種々の材料を用いた高流動コンクリートの配合特性や耐久性などの種々の性能を明らかにし、その自己充てん性が得られるメカニズムに立脚した合理的な配合設計手法を提案することを目的としたものである。

本論文はこれらの研究成果をまとめたものであり、全6章より構成される。

第1章は序論であり、まず自己充てん型高流動コンクリートの研究開発の現状についてまとめ、高流動コンクリートに有望な新材料の展望について論じている。そして、本研究の目的について述べた。

第2章は、粉体系高流動コンクリートの自己充てん性について論じている。産業副産物をソースとした新材料も含め、特にスラグ細骨材や石灰岩砕砂、比表面積の異なる種々の鉱物質微粉末を用いた粉体系高流動コンクリートの配合特性を明らかにしている。そして、本実験で得られた結果と土木学会高流動コンクリート施工指針で示されている配合の目標値との比較検討を行った。その結果、単位水量は施工指針を満たしているものの、粉体絶対容積、水粉体容積比および粗骨材絶対容積について、この施工指針の範囲内を満たさないケースもあることが分かった。これより、このようなスラグ細骨材等を含めた新材料を用いた場合は、指針内の目標値の範囲を広げる必要があると考えられる。

第3章は、第2章で示された粉体系高流動コンクリートの凝結特性、ブリーディング特性について検討した。さらにフレッシュコンクリートの流動特性を Bingham 流体と仮定しそのレオロジー特性について論じている。粉体系高流動コンクリートでは、ブリーディングは殆ど問題とならないこと、使用するスラグ細骨材の種類により凝結特性は大きく異なることを確認した。また、コンクリートの単位水量や単位容積質量の影響が主要因となり、銅スラグ細骨材および高炉スラグ細骨材を用いた場合は、フェロニッケルスラグ細骨材を用いた場合と比べ、塑性粘度および降伏値が低下する傾向にあることを明らかにした。

第4章は、高流動コンクリートの硬化後の品質、すなわち力学的特性や乾燥収縮特性、自己収縮特性、中性化、凍結融解抵抗性などの耐久性について検討し、硬化後の品質特性について論じている。特に、スラグ細骨材の混合率の増加に伴い、粉体系高流動コンクリートの凍結融解抵抗性は低下する傾向にあることが分かった。これは、コンクリートの練混時に比較的粗い気泡組織が形成され易いためである。しかし、AE 剤を用い適切な空気泡を連行させることにより、スラグ細骨材を単味で使用した場合であっても十分な耐凍害性を確保できるものと考えられる。また、使用する鉱物質微粉末によっても高流動コンクリートの凍結融解抵抗性は大きく異なることから、それらの特性を十分に考慮し用いることが必要である。そして、本実験に使用した材料により高流動コンクリートに十分な耐凍害性を得るためには、気泡間隔係数を  $300\ \mu\text{m}$  程度以下、硬化後の空気量を 5% 以上とすることが望ましい値と思われる。また、上記凍結融解抵抗性以外の硬化コンクリートの性質は、土木学会高流動コンクリート施工指針に記述されている特性とほぼ同様な傾向にあることを示した。

第5章は、これまでの研究成果を踏まえ粉体系高流動コンクリートの配合設計手法について論じた。粉体系高流動コンクリートの自己充てん性を得るためのメカニズムは、粗骨材とモルタルの密度差に支配されており、水粉体容積比や粗骨材絶対容積など配合設計を行う上でキーポイントとなる因子は、それらにより評価できることを明らかにした。そして、粗骨材とモルタルの密度差を指

標とした新たな配合設計手法の提案を行った。

第6章は、本研究の総括として結論を述べている。

主指導教員 庄谷 征美

# Experimental Study on Mixture Proportioning Method and Performances of Powder-Type Self-Compacting Concrete

Kazuki TOKUHASI

## Abstract

Nowadays, the performance required for concrete structures has got more complicated and diversified. In order to obtain this demand, the development of high-performance concrete, with either high fluidity and self-compactability to attain rationalized and labor-saving effects for manufacturing and placing of concrete, or high strength or high durability securing good serviceability and long service life of concrete structures, is eagerly required.

The research activity, for solving unsettled problems to get the high performance concrete, is urgently needed. In special, in recent Japan, the early stage deteriorations of concrete structures have been detected in almost all of the country. The main causes suffering these deteriorations are recognized resulting from the man-hand placing and the inadequate consolidation in the concrete execution. Therefore, the strong concern on the development of high performance concrete with high fluidity and little segregation, has come to be paid.

From above social and technical requirements, the concept of self-compacting concrete without necessity for consolidation, was proposed by professor Okamura at Tokyo University who firstly developed the proto-type self-compacting concrete 1988. After many practical applications, "Recommendation for Self-Compacting Concrete" was published by JSCE in 1998. In the recommendation, the term "self compacting concrete" is defined as high fluidity concrete without impairing the resistibility to segregation in fresh state.

The proper resistance for segregation of powder-type self-compacting concrete and high fluidity are exhibited by powder materials like mineral admixtures and high range water reducing agent, respectively. However, rationalized mixture proportioning method of powder-type self-compacting concrete has not yet been achieved, because of the variety in type and plenty of combinations of constituent materials. In addition to it, the concept of mixture proportioning based on durability but self-compactability has not been accepted, though the susceptibility to frost damage is the very important subject due to the possible existence of rough and large air bubbles entrapped in mixing operation.

From these back grounds, first of all, the study aimed at the clarification of performances of powder-type self-compacting concrete. Those are characteristics in mixture proportioning and durability, varying dependent on the combination of various constituent materials containing industrial by-products, the procedure and method for production, and the type and amount of powder adopted, and so on. Second, the study also aimed at the proposal of rationalized mixture proportioning method of powder-type self-compacting concrete, based on the mecha-

nism governing the self-compactability. In the doctoral thesis, these results were described in the following six chapters.

In chapter 1 “Introduction”, the state-of-the-art of the research and technical development on self-compacting concrete was stated, and the prospect of new source of materials promising for self-compacting concrete was also referred.

In chapter 2 “Self-Compactability of Powder-Type Self-Compacting Concrete”, the self-compactability of powder-type high fluidity concrete was described. The characteristics of mixture proportioning of the concretes, having new source of aggregates such as slag fine aggregates of industrial by-products discharged in the refinery process of metals, including inexperienced crushed sands and different type of mineral fine powders with different level of specific surface area, were investigated. Results showed that there existed some cases showing not conforming to target range or regulated values in JSCE recommendations such as absolute volume of powder, water to powder volume ratio and absolute volume of coarse aggregates. Therefore, some target ranges in the recommendation were judged to be necessarily extended when new types of materials were adopted.

In chapter 3 “Fresh Properties of Powder-Type Self-Compacting Concrete”, the performances of freshly mixed powder-type self-compacting concrete such as properties for setting and bleeding were investigated. In addition, the rheological constants of plastic viscosity and yielding value were discussed when the Bingham fluid was adapted for the concrete flow. The viscosity and yielding values of concretes with copper slag and blast-furnace slag fine aggregates lowered with the increase of volume fraction of slag. It was also made clear that there showed little bleeding water and that the setting properties greatly changed depending on the type of slag fine aggregates.

In chapter 4 “Hardened Properties of Powder-Type Self-Compacting Concrete”, the properties of hardened concretes such as mechanical properties, autogenous and drying shrinkage properties, water tightness, neutralization and freezing and thawing resistance. In special, the freezing and thawing resistance of powder-type self-compacting concrete was confirmed being lowered with the increase of volume fraction of slag fine aggregates mixed to normal fine aggregates. It was made clear that this deterioration was due to the possibly easier formation of many entrapped large air bubbles in the process of mixing of concrete. Conclusively, the required amount of air and spacing factor were recognized appropriate for 5% and less than  $300\ \mu\text{m}$ , respectively, in order to attain satisfactory frost resistance of powder-type self-compacting concrete.

In chapter 5 “Mixture Proportioning Method for Powder-Type Self-Compacting Concrete”, the mixture proportioning method of powder-type self-compacting concrete was discussed from the results previously investigated. The mechanism to attain self-compactability of powder-type self-compacting concrete was clarified to be surely governed by the difference of density between mortar and coarse aggregates. The absolute volume of coarse aggregates and water powder volume ratio, which were considered as key factors for mixture proportioning, could be estimated from it. The new mixture proportioning method, based on the difference

of density between them, was proposed.

In chapter 6 “Conclusions”, the conclusion was addressed summarizing previously investigated results on powder-type self-compacting concrete.

Professor (Chairperson) Masami SHOYA