高強度コンクリートの材料分離性評価と その応用に関する研究

学位論文内容の要旨

近年高層鉄筋コンクリート造建築に多く用いられる設計基準強度が 36N/mm^2 を超える高強度コンクリートは、一般のコンクリートに比較して水セメント比が小さく単位セメント量が多いことから、フレッシュコンクリートの粘性が高くなり、スランプ 18cm 程度のワーカビリティでは打込み、締固め、仕上げ等の施工に支障をきたす場合がある。このため、高強度コンクリートではスランプ 23cm 程度またはスランプフロー管理の流動性を高めたコンクリートが標準となっている。このような高流動なコンクリートでは材料分離が発生し易くなることが指摘されているが、材料分離が発生する流動性の限界及び材料分離が高強度コンクリートの施工性や硬化性状に及ぼす影響を定量的に把握した例はない。本研究は、高強度コンクリートの材料分離性を評価し、材料分離したコンクリートが構造体に打ち込まれた場合にどのような挙動を示すのかを明確にして高強度コンクリートのフレッシュ性状の管理指標を示すとともに、調合設計における目標値を提案することを目的とした。さらに、材料分離に加えて施工時期による構造体コンクリートの強度発現性の違いおよび打込み温度の影響を考慮した高強度コンクリートの調合設計法を提案した。

本研究は 8 章で構成され、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章は序論であり、研究の背景と目的、および論文の構成を示した。

第 2 章は、一般のコンクリート、高強度コンクリートおよび高流動コンクリートの材料分離抵抗性とそれに関連する流動性についての既往の研究、および高強度コンクリートの構造体における力学性状についての既往の研究について調査、整理した。

第 3 章は、設計基準強度 $48\sim 54\text{N/mm}^2$ 程度に相当する高強度コンクリートを対象として、スランプフローの設定値の異なる場合の材料分離抵抗性を定量的に把握し、さらにフレッシュコンクリートの性状から材料分離程度の推定を行った。レオロジーの観点からは、コンクリートの降伏値はスランプフロー値でほぼ表すことができ、また、 50cm フロー時間と塑性粘度は良好な関係にあり、 50cm フロー時間でコンクリートの粘性をある程度評価できることがわかった。さらに、スランプフローが大きいかほど材料分離の程度は大きくなる傾向があり、コンクリートの材料分離抵抗性には、塑性流動開始時の最大抵抗力であり粘着力と内部摩擦力の和で表される降伏値が大きく関与しているとの結果を得た。型枠に詰められたコンクリート試料に振動を与えて、強制的に分離を起こして求めた上部材料分離指数を、粗骨材に付着しないモルタルの移動量を表すものとして検討を行った結果、付着モルタル量と移動モルタル量の関係から求めた上部材料分離指数の推定値は実験で求

めた指数の±10%程度の範囲にあり、良好な対応を示した。この結果から、スランプフロー値を用いて振動を与えた高強度コンクリートの材料分離の程度を定量的に把握することができるものと判断された。

第4章は、振動締固めを前提とした高強度コンクリートの材料分離が硬化性状に及ぼす影響を、実大の柱模擬試験体を用いて検討した。この結果、材料分離を起こしたコンクリートを構造体に打ち込んだ場合、その力学性状の傾向が健全なコンクリートと大きく異なり、また、力学性状以外に温度上昇や長さ変化の変動も大きくなり、構造体として均質な性能を保証できない可能性があることがわかった。材料分離の許容限界として、粗骨材面積率が平均値の90%程度となることを示し、第3章で求めた上部材料分離指数を20%以下とすることで均質な構造体コンクリートを得ることができるとの結果を得た。

第5章は、部材中で材料分離を起こした高強度コンクリートについて、既往の複合則理論式を応用して材料分離を考慮したヤング係数の評価を行い、コンクリート品質の不均一さを定量的に示すことを目的として検討を行った。この結果、セメントペーストおよび粗骨材のヤング係数を適切に設定することで、粗骨材とモルタルの比率を変化させた高強度コンクリートのヤング係数、さらに、材料分離した高強度コンクリートのヤング係数を複合則理論式により評価することができた。また、第4章の模擬部材実験の結果に、材料分離を考慮した複合則理論式によるヤング係数の推定を適用した結果、部材内部での高さ方向のヤング係数の違いを再現でき、この結果から、材料分離による部材内部のヤング係数の分布の範囲を示すことができた。

第6章は、施工時期が高強度コンクリートの構造体中での強度発現に及ぼす影響の把握、および暑中環境での高強度コンクリートの施工を行う際の基礎資料を得ることを目的として検討を行った。1年を通じて行った実験で、部材の温度上昇量は打込み温度が高いほど大きくなり、打込み温度の上昇に応じて、部材内部の温度上昇量も増加する結果を得た。また、一般強度のコンクリートでは現場封かん養生強度とコア強度が同等の値となったが、高強度コンクリートではコア強度が現場封かん養生強度よりも小さな値となることが確認された。普通ポルトランドセメントを使用した高強度コンクリートでは、28日標準養生強度に対する91日コア強度比は、夏期に施工した場合に小さくなるとともに、施工時期により部材内部の強度発現傾向が異なる結果となった。しかし、夏期施工を想定した練上がり温度35℃以上のコンクリートでもスランプフロー、50cmフロー時間および凝結時間は施工に支障をきたさない範囲であり、中庸熱セメントを使用することで35℃を超える高温のコンクリートでも、一般的な環境でのデータを基に算定した調合で、構造体コンクリート強度の確保は十分可能であるとの結果を得た。

第7章は、本研究で得られた材料分離性評価の成果を設計基準強度100~120N/mm²の超高強度コンクリートに適用した例と、材料分離を考慮した高強度コンクリートの調合設計法およびその適用例を示した。

第8章は結論であり、本研究の成果を要約した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 名 和 豊 春
副 査 教 授 恒 川 昌 美
副 査 教 授 松 藤 敏 彦
副 査 准教授 胡桃澤 清 文

学 位 論 文 題 名

高強度コンクリートの材料分離性評価と その応用に関する研究

日本建築学会の鉄筋コンクリート工事標準仕様書には、設計基準強度 36N/mm^2 を超える高強度コンクリートの流動性において材料分離を考慮することと記述されているが、高強度コンクリートの材料分離を定量的に評価した研究例は少ない。さらに、材料分離が発生する流動性の限界及び材料分離が高強度コンクリートの施工性や硬化性状に及ぼす影響を考慮した定量的に把握した研究例はない。

本研究は、このよう現況の中で、使用量が最も多い設計基準強度 $48\sim 54\text{N/mm}^2$ の高強度コンクリートを対象として振動締固めによる高強度コンクリートの材料分離性を評価する方法を提案している。また、提案した方法で評価した材料分離と構造体に打ち込まれた硬化コンクリートの性状の関係を明確にすることにより、調合設計における材料分離抵抗性の目標値を提案している。さらに、材料分離以外の打込み温度や施工時期による構造体コンクリートの養生温度の変化も考慮した汎用性の高い高強度コンクリートの調合設計法を提案している。

本研究は 8 章からなり、以下に本研究で明らかとなった知見を各章ごとに要約する。

第 1 章は序論であり、研究の背景と目的、および論文の構成を示している。

第 2 章は、コンクリートの材料分離抵抗性、材料分離とコンクリートの流動性・レオロジー特性との関係および高強度コンクリートの構造体の力学性状についての既往の研究動向について概説している。

第 3 章は、設計基準強度 $48\sim 54\text{N/mm}^2$ に相当する高強度コンクリートを対象として、材料分離の評価とレオロジー特性からの材料分離抵抗性推定モデルについて述べている。はじめに、材料分離抵抗性は型枠に詰められたコンクリートの振動時の粗骨材の移動量、言いかえると粗骨材に付着しないモルタル移動量の関数として材料分離を定量的に評価し、コンクリートのスランプフローが大きいほど材料分離の程度は大きくなることを示した。また、コンクリートのスランプフロー値は降伏値とよい相関があることを明らかにし、コンクリートの材料分離抵抗性は流動開始時の最大抵抗力であり、粘着力と内部摩擦力の和である降伏値に大きく依存していることを示した。さらに、粗骨材に付着したモルタル量が降伏値の関数で表されることを理論的に示すとともに、これより粗骨材

に付着しないモルタル量を求め材料分離を推定するモデルを構築した。提案したモデルの材料分離の推定値は実験値の±10%程度の範囲にあり、理論的に高強度コンクリートの材料分離の程度を推定できることを示している。

第4章は、高強度コンクリートの材料分離が硬化性状に及ぼす影響を、実物大の柱模擬試験体を用いて検討している。その結果、材料分離を起こしたコンクリートを構造体に打ち込んだ場合、力学性状、温度上昇や長さ変化は健全なコンクリートに比べ部材内で大きく変動し、構造体として不均質となることを示した。また、性能を保證できる材料分離の許容限界を示すとともに、第3章の室内試験での材料分離の評価指数との関連性も明らかにした。

第5章は、複合則理論式による高強度コンクリートのヤング係数の推定について述べており、材料分離の有無にかかわらず高強度コンクリートのヤング係数を評価でき、かつ第4章の模擬部材実験における部材内部での高さ方向のヤング係数の違いをよく再現できることを明らかにしている。

第6章は、施工時期や打込み温度が構造体中での高強度コンクリートの強度発現に及ぼす影響について検討している。その結果、普通セメントを使用した高強度コンクリートでは、施工時期により部材内部の強度発現傾向が異なり、打込み温度の上昇に応じて部材内部の温度上昇量も増加し、28日標準養生強度に対する構造体強度の比は夏期で小さくなることを示した。なお、セメントを中庸熱セメントに変えることで、練上がり温度35℃以上のコンクリートの夏期施工でも流動性および凝結時間に支障をきたさず、構造体コンクリート強度を十分に確保できるとの結果を得た。

第7章は、前章までの知見を基に、材料分離や打込み温度を考慮した高強度コンクリートの調合設計法を提案している。また、提案した調合設計方法を実際に設計基準強度48N/mm²の高強度コンクリートの工事に適用して良好な品質管理結果を得ており、提案した調合設計方法の妥当性についても検証している。

第8章は結論であり、本研究の成果を要約している。

これを要するに、著者は、材料分離や打込み温度が高強度コンクリートの物性に及ぼす影響を定量的に評価するとともに、その成果に基づいて高強度コンクリートの調合設計を提案かつ検証したものであり、建設工学および材料工学に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。