

## 200N/mm<sup>2</sup> 級超高強度コンクリートの性状に影響を及ぼす結合材料の特性に関する研究

著者	野村 博史
学位授与年月日	2016-09-16
URL	<a href="http://doi.org/10.15083/00075249">http://doi.org/10.15083/00075249</a>

## 論文の内容の要旨

論文題目 200N/mm<sup>2</sup>級超高強度コンクリートの性状に影響を及ぼす結合材料の特性に関する研究

氏名 野村 博史

高強度コンクリートは、土地及び空間の有効利用を進める上で構造物の高層化及び大スパン化を実現するのに重要な役割を担う建築材料だと言える。1988～92年の建設省総合プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発（通称 New RC 総プロ）」の成果を経て、設計基準強度 Fc100N/mm<sup>2</sup>のコンクリートが実用化されるようになり、近年に至っては Fc200N/mm<sup>2</sup>級の超高強度コンクリートの研究開発が相次いで進められている。

しかしながら、超高強度コンクリートの更なる性能向上を図る上で、例えば強度や流動性に対しどのような結合材を使用するのが最適なのか、材料設計の観点から十分には解明されていない。既往の研究によると、コンクリートの圧縮強度は概ね空隙率に依存するため、高強度化を図るためには如何に水結合材比（以下、W/B）を下げるかが重要となる。ところが、低 W/B の調合条件では流動性の確保がより難しくなるため、結合材料の粒子の充填性（粒度分布）や形状といった物理性状が重要視されている。また、結合材料の物理化学特性が普通強度コンクリートの性状に及ぼす影響については、主に流動性、強度に関してこれまで報告事例があるものの、低 W/B で製造される超高強度コンクリート用結合材としての評価事例はごく限られているのが現状である。

本研究では、超高強度コンクリート用結合材の開発・改善を通じて超高強度コンクリートの更なる性能向上もしくは性能を維持しながらのコスト低減に資することを最終目的として、超高強度コンクリートの練混ぜプロセス、流動特性及び強度発現メカニズムを明らかにすると共に、練混ぜ性、流動性及び強度に影響を及ぼす結合材料の特性を明確にすることを目的とした。

本論文の結論を以下に記述する。

第1章では、本研究の背景と目的、対象範囲及び構成について記述した。

第 2 章では、本研究の対象範囲である  $F_c100\sim200\text{N/mm}^2$  の強度領域に限らず、結合材料の物理化学特性がコンクリート等の性状に及ぼす影響について既往研究を調査した。その結果、材料特性が及ぼす影響をメカニズムと関連づけて考察した事例は限定的であり、普通強度コンクリートの性状に影響を及ぼす材料特性が、超高強度コンクリートのそれに対しても同様の影響を及ぼすかどうかは不明であることが示唆された。

第 3 章では、超高強度コンクリートの練混ぜ性に影響を及ぼす結合材料の特性を明らかにするため種々の実験検討を行った。その結果、以下の事象が確認されたため、超高強度コンクリートの練混ぜ性は、概ねペーストの練混ぜ性と変形性（流動性）の 2 つに規制されていることが示唆された。

- (1)骨材容積割合は、超高強度コンクリートの所要練混ぜ時間にあまり影響を及ぼさない
- (2)超高強度コンクリートの練混ぜ性は、同一結合材を用いたペーストの練混ぜ性に概ね依存する
- (3)超高強度コンクリートの練混ぜ性は、同一結合材を用いたモルタルの変形性の影響を受け、モルタルの変形性が乏しいとコンクリートの練混ぜ性は悪化する
- (4)モルタルの変形性は、同一結合材を用いたペーストの変形性に概ね依存する

また、練混ぜプロセスにおけるペーストの均質一体化を解明すべく粒子及び水分の凝集・分散挙動について定量評価を行うことにより、関連する材料特性について以下の通り考察した。

- (1)「結合材が粉体状を呈する段階」では、練混ぜに伴い凝集造粒が進行する傾向が認められ、低 W/B ペーストの練混ぜ性には結合材の造粒のし易さが関与している可能性がある
- (2)既往文献に示される造粒機構によると、結合材の造粒のし易さにはその分散性や充填性が影響を及ぼしている可能性がある

そこで、これらの考察の妥当性を検証すべく結合材料の特性が低 W/B ペーストの練混ぜ性に及ぼす影響を評価したところ以下の事象が確認された。

- (1)造粒し易い結合材ほど低 W/B ペーストの所要練混ぜ時間は短い
- (2)シリカフェーム（以下、SF）等の超微粒子は分散性に優れるものほど低 W/B ペーストの所要練混ぜ時間が短い
- (3)SF 粒子の分散が進行するにつれ結合材の充填性は高まり、結合材の充填性が高いものほど表面水を確保し易いため低 W/B ペーストの練混ぜ性に優れる

以上より、SF 等の超微粒子においては分散性が、結合材においては充填性が、超高強度コンクリートの練混ぜ性に対して最も重要な特性であると結論づけた。

第 4 章では、超高強度コンクリートの流動性に影響を及ぼす結合材料の特性を明らかに

するため種々の実験検証及び検討を行った。その結果、以下の事象が確認され「結合材料の粒子形状が大きく相違しなければ、ペーストの流動性は結合材の充填性に概ね依存する」ことが示された。

- (1) 結合材の充填率が高いほど拘束水比は小さくなり変形係数は大きくなる傾向がある
- (2) ペーストの塑性粘度は結合材の充填率及び平均配位数によって説明づけることができ、充填率が高いほど塑性粘度は小さくなる
- (3) 高性能 AE 減水剤の添加量を増やすと、ペーストの降伏値及び塑性粘度は小さくなる傾向が認められ、主として粒子の凝集・分散状態によって規制されている可能性がある
- (4) ペーストの付着特性は特定の W/B に限って結合材の充填率と説明づけることができ、充填率が高いほど最大付着荷重は小さくなる

また超高強度ペースト及びコンクリートの流動特性について比較考察を行った。その結果、以下の事象が確認され、超高強度コンクリートの流動性は同一結合材を用いたペーストの流動性に概ね依存することが示された。

- (1) ペーストの 0 打フローが大きくなるとフロー時間は短くなる傾向が認められ、フロー試験値には単にペーストの降伏値だけでなくフローコーンが引き上げられるときに作用する慣性力の影響が現れている
- (2) コンクリートのスランプフローが大きくなるとフロー時間は短くなる傾向が認められ、ペーストと同じ流動特性を表している
- (3) コンクリートとペーストのフロー性状には概ね相関が認められる

以上より、充填性の高い結合材を使用することで超高強度コンクリートの流動性は改善されると考えられ、材料特性の内、結合材の充填性が超高強度コンクリートの流動性に対して最も重要な特性であると結論づけた。また、ペーストの降伏値が主として粒子の凝集・分散状態によって規制されている可能性を考慮して、流動性に影響を及ぼす材料特性として粒子の分散性を指摘した。

第 5 章では、超高強度コンクリートの強度に影響を及ぼす結合材料の特性を明らかにするため種々の実験検証及び検討を行った。その結果、以下の事象が確認され「Fc100～200N/mm<sup>2</sup> 級の超高強度コンクリートの強度発現は、セメント及びポズラン材の水和反応により生成した C-S-H がゲル空隙～毛細管空隙を充填して硬化体組織をより緻密にした結果、もたらされたものである」ことが示唆された。

- (1) 材齢 8 日まで 20℃封緘養生を行うとポズラン材の使用の有無による強度差は認められず、100N/mm<sup>2</sup> 程度までの強度発現はセメントの水和反応と結合材に充填効果によることが示唆された
- (2) 材齢 8 日まで 20℃封緘養生を行うと水和反応の進行に伴いゲル空隙～毛細管空隙が形成されたのに対し、90℃封緘養生を施すと練上がり直後の試料と同程度の緻密さ

となり、ゲル空隙～毛細管空隙は計測されなかった

(3)コンクリートの圧縮強度は、同一結合材を使用したペーストの総細孔容積に概ね依存する

(4)養生温度が高いほどポゾラン反応量及びクリンカー鉱物反応量は増加する傾向が認められ、同一調合においては硬化体組織の緻密化が進行し強度が増進する傾向が認められた

(5)ポゾラン反応量又はクリンカー鉱物反応量のみを分析評価しても、異なる調合間のコンクリート圧縮強度及びペースト総細孔容積を説明づけることはできない

(6)ポゾラン材の使用の有無に拘らず C-S-H 生成体積を示す指標が大きいほどコンクリート圧縮強度は高くなり、ペースト総細孔容積は小さくなる傾向が認められた

この強度発現メカニズムに基づくと超高強度コンクリートの強度に影響を及ぼす結合材料の特性は、セメント及びポゾラン材の水和活性を規制する要因であると考えられた。そこで、関連する材料特性を導出しその影響を評価したところ、以下の知見が得られた。

(1)SF 及びフライアッシュのポゾラン活性について、ポゾラン材の Si 及び Al の溶出量が多いほど圧縮強度は高い傾向が認められ、アルカリ溶液における両成分の溶出特性はポゾラン活性を説明づける因子として有効である

(2)セメントの鉱物組成（品種）が強度に及ぼす影響について、結合材のベースセメントを低熱ポルトランドセメント（以下、LC）から中庸熱ポルトランドセメントに置換すると、加熱養生品では約 8%の強度低下が認められ、この強度差は C-S-H 生成体積によって説明づけることができる

(3)セメントのブレン比表面積が強度に及ぼす影響について、同一ロットの LC を粉碎して比表面積を大きくしたものに置換すると殆ど強度差が認められず、C-S-H 生成体積を示す指標にも殆ど違いがなかった

以上より、超高強度コンクリートの強度発現に対しポゾラン材においては Si 及び Al の溶出特性が、セメントにおいては鉱物組成（C<sub>2</sub>S 量）が最も重要な特性であると結論づけた。

第 6 章では、本論文の結論を記述すると共に、今後の課題を整理した。