

論文

[1027] 高流動コンクリートのレオロジー特性に関する研究

泉 達男¹・山室 穂高²・村原 伸²・水沼 達也³

1. はじめに

締固め不要コンクリート（以後、高流動コンクリートと称す）は、高流動性と材料分離抵抗性の二律背反する性能を満足することで優れた充填性を発現するコンクリートである [1]。現在提案されている高流動コンクリートは、1) 骨材の一部を微粉末に置換する方法、2) 微粉末と増粘剤を併用する方法等によって分離抵抗性を改善している。後者の方法は硬化遅延性の問題を抱えており、前者の方法では硬化物性への影響は殆ど心配ないものの、単位結合材量が 500 kg/m³ 以上になるため、その経済性が問題となってきている。材料分離としては、1) 水と固体の分離、2) ペーストと骨材の分離、3) モルタルと粗骨材分離とに大別でき、特に2)、3) の材料分離はコンクリート中のモルタルやペーストの粘度や量に起因していると考えられる [2]。

本研究では、二重円筒型レオメーターを用いて微粉末や増粘剤を添加したペーストおよびモルタルのレオロジー特性およびフロー値を測定し、混和材の特性による粘性や流動性への影響について調べると共に、高流動コンクリートにおける最適増粘機構について検討したものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合条件

微粉末としては高炉スラグ、フライアッシュおよび石粉を用い、粉末単独でのペーストとセメントの一部を微粉末で置換した（置換率 50%）モルタルで流動性およびレオロジー特性を測定した。増粘剤の評価は結合材がセメントのみのモルタルで流動性およびレオロジー特性を測定した。使用した材料の比重および粉末度を表-1に示した。また、各ペーストおよびモルタルの配合条件を表-2に示した。

表-1 使用材料の物性

セメント	普通ポルトランドセメント（比重 3.16、比表面積 3,400 cm ² /g）
高炉スラグ	比重 2.89、比表面積 3,950、6,050、7,950 (cm ² /g)
フライアッシュ	比重 2.29、比表面積 3,690 cm ² /g
石粉	石灰石微粉末（比重 2.71、比表面積 3,300 cm ² /g）
細骨材	紀ノ川産川砂、比重 2.57、粗粒率 2.89
増粘剤	天然多糖高分子 A, B, C、天然多糖誘導体 D, E、非天然高分子 F, G
分散剤	芳香族系従来品（a）、芳香族系共縮合品（b）

*1 花王(株)和歌山研究所 主任研究員、工修（正会員）

*2 花王(株)和歌山研究所 研究員、工修

*3 花王(株)和歌山研究所 グループリーダー、工修（正会員）

表-2 配合条件

種類	分散剤	水結合材比	細骨材結合材比
微粉末ペースト	芳香族系従来品 (a)	35%	—
微粉末置換モルタル	芳香族系従来品 (a)	35%	1.56
増粘剤添加モルタル	芳香族系共縮合品 (b)	35%	1.56

2. 2 実験方法

2.2.1 流動性の評価

ペーストおよびモルタルの調製は、モルタルミキサーに結合材（セメント、微粉末）、水（分散剤、増粘剤を含む）を投入し、低速（63rpm）1分間、高速（126rpm）2分間練り混ぜた。流動性の評価はフローテーブルの中央に置いたコーン（90φ×50mm）にセメントペーストを詰め、コーンを引き上げた後のペーストの広がり（静置フロー値）を測定し、指標とした。

2.2.2 流動速度の評価

ペーストおよびモルタルの流動速度の評価は、図-1に示したL型フロー試験装置を用い、ペースト（モルタル）がゲートから40cm流動した時の時間を測定し、指標とした。

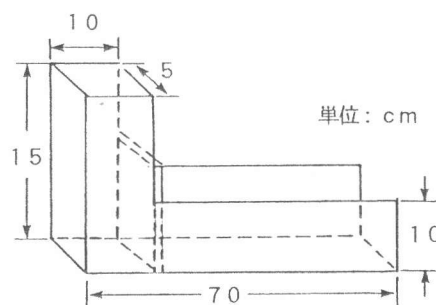


図-1 L型フロー試験装置

2.2.3 レオロジー特性の評価

ペーストのレオロジー特性は、内筒表面にスパイラル状に溝を付け、ペーストとの滑りと粒子の沈降を抑制した内円筒回転型レオメーター（外筒φ27mm、内筒φ25mm）を用い、練り上がり直後に測定した。レオロジー曲線は、内筒を100sec⁻¹まで50秒で指数的に上昇・下降させて測定し、上昇時の低せん断ひずみ速度条件時（0～10sec⁻¹）と高せん断ひずみ速度条件時（10～100sec⁻¹）における見掛け粘度および降伏値を求めた。

モルタルのレオロジー特性も同様の内円筒回転型レオメーター（外筒φ27mm、内筒φ14mm）を用い、見掛け粘度および降伏値を求めた。

2.2.4 吸着量の測定

水セメント比（以後、W/Cと略す）100%の条件で0.5wt%増粘剤水溶液にセメントを加え、5分間手で攪拌したペーストを25分間静置した後、3,000rpmで15分間遠心分離した。上澄液中の増粘剤量を有機炭素量分析（TOC）によって測定し、添加量との差から算出した値を増粘剤のセメントに対する吸着量とした。

2.2.5 遅延時間の測定

W/C=100%の条件で増粘剤を0.5wt%（対水重量%）添加してセメントペーストを調製し、カロリーメーターで第2発熱ピーク時間を測定した。増粘剤添加時と無添加時の発熱時間の差を増粘剤による遅延時間とした。

3. 実験結果および考察

3.1 微粉末ペーストのレオロジー特性と流動性

水微粉末比（以後、W/Pと略す）35%の条件で分散剤を添加し、フロー値 270 ± 5 mmに調製した微粉末ペーストのレオロジー曲線を図-2に示した。いずれの微粉末ペーストも降伏値を有するビンガム体として表される。ペーストの流動性を同一条件にしてレオロジー特性を測定したため、降伏値はほぼ一定（0.9~2.0Pa）であったが、塑性粘度に明かに違いが認められた。

吉野ら[3]によれば、同一流動性のモルタルにおいても配合が異なると塑性粘度が大きく変化している。

そこで、ペーストの塑性粘度と流動性の関係を検討するため、分散剤量を変化させた場合のペーストの見かけ粘度を図-3に示した。図-3より、石粉やフライアッシュでは0.4 Pa·sまでペースト粘度を上げると230mm程度まで流動性が低下するが、高炉スラグの場合0.8 Pa·sのペースト粘度でもフロー値270mm以上の高流動性を維持できることが分かった。コンクリートの分離抵抗性はペーストやモルタルの粘性に依存しており、今回検討した微粉末の中では高炉スラグが最も分離抵抗性付与に適した材料であると考えられる。

次に高炉スラグの粉末度を変化した場合のレオロジー曲線を図-4に示した。粉末度が細くなるとダイラタンシー性状が認められた。また、せん断速度 40 s^{-1} 付近で見掛け粘度の増加傾向が変化したため、まず実際のペースト挙動と見掛け粘度との相関性について調べた。ペースト粘度とフロー速度の関連性は、従来より知られている

[2]。低せん断ひずみ速度（ $0-10 \text{ s}^{-1}$ ）及び高せん断ひずみ速度（ $10-100 \text{ s}^{-1}$ ）条件での見掛け粘度とフロー速度との関係を図-5、6に示した。低せん断ひずみ速度条件ではペーストの粘性と流動速度との間に正の相関が認められたが、高せん断ひずみ速度条件では全く逆の負の相関になることが分かった。ペーストの流動挙動に関しては、ペーストの平均流動速度（6-10cm/s）と比較的近い、低せん断ひずみ速度条件での見掛け粘度を用いた。

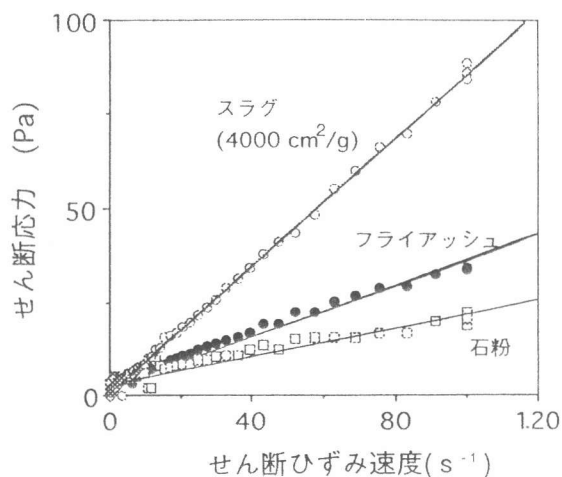


図-2 微粉末ペーストのレオロジー曲線

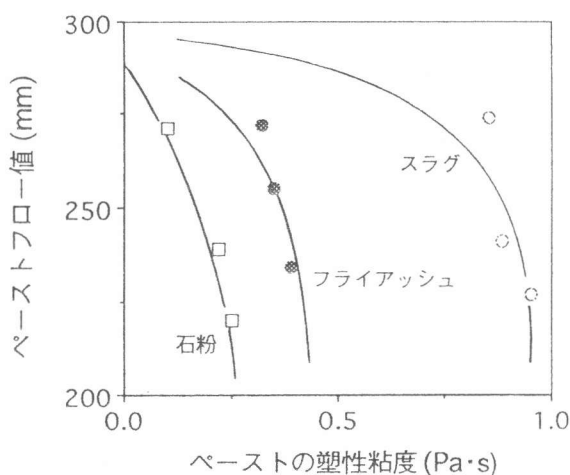


図-3 微粉末ペーストの粘度と流動性

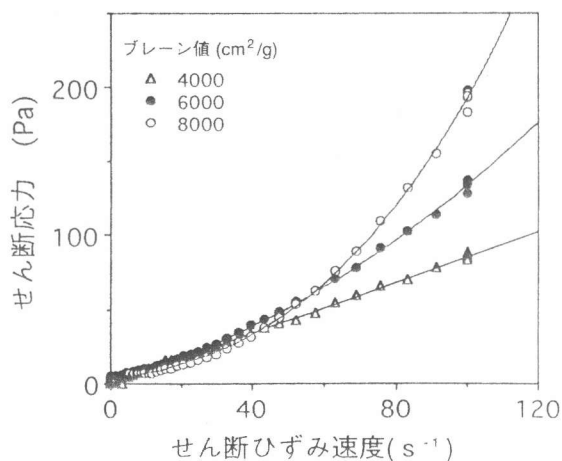


図-4 微粉末ペーストのレオロジー曲線

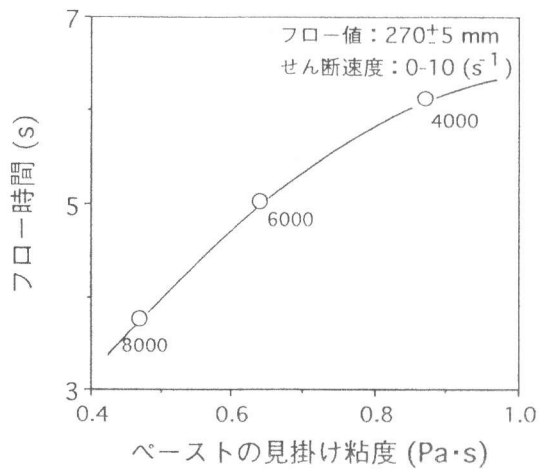


図-5 微粉末ペーストの粘度と流動速度

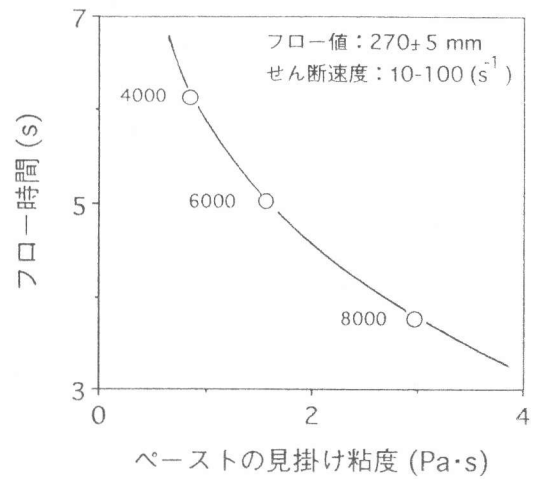


図-6 微粉末ペーストの粘度と流動速度

高炉スラグの粉末度を変化させた場合のペーストの見掛け粘度と流動性の関係を図-7に示した。高炉スラグだけのペーストでは、粉末が細くなる程ペーストの見掛け粘度の増大に伴う流動性低下が顕著になる傾向が認められた。

ところが、セメントの50%を高炉スラグで置換したモルタルで同様の試験を行った結果、表-3に示す様に微粉末単独のペーストの場合とは逆に粉末の細かい方が、同一流動性（モルタルフロー285±5mm）で、より高い見掛け粘度を有していることが分かった。

このことは、セメントとのブレンドに伴う、粒度分布やセメント初期水和等の変化が原因であると思われる。モルタル粘度を最大にするスラグ置換率やW/Pが存在する可能性はあるが、今回の実験の範囲で考えると微粉末だけでモルタルフロー値270mm以上を維持するには塑性粘度3.0Pa·sが限界であることが分かった。

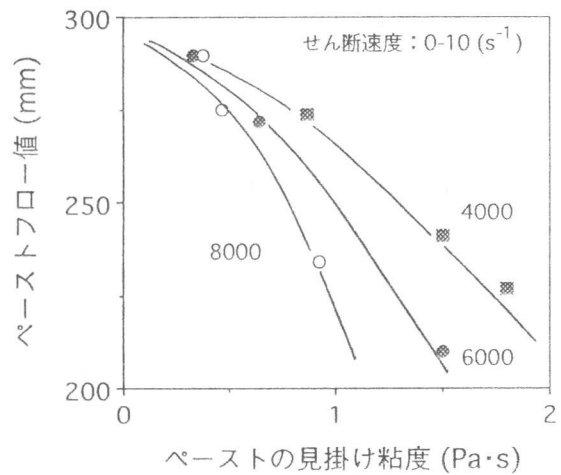


図-7 微粉末ペーストの粘度と流動性

表-3 スラグ置換モルタルのレオロジー特性と流動性

種類	ブレン値 (cm ² /g)	分散剤量 (wt%)	モルタルフロー値 (mm)	見掛け粘度 (Pa·s)
スラグ1	3,950	1.30	282	2.24
スラグ2	6,050	1.45	290	2.96
スラグ3	7,950	1.60	285	3.08

見掛け粘度は、せん断ひずみ速度0-10s⁻¹時のものを採用した

3. 2 増粘剤添加モルタルのレオロジー特性と流動性

天然物多糖類を中心に数多くの水溶性高分子が高流動コンクリート用の増粘剤として用いられている。W/C=35%、モルタルフロー値：250 mmの条件でセメントに吸着するタイプ（天然多糖高分子 A、吸着量1.5mg/g）と全く吸着しないタイプ（非天然高分子 F、吸着量0.0mg/g）モルタルに添加した場合のレオロジー特性を検討した。

図-8より、吸着タイプの増粘剤を添加したモルタルがビンガムの挙動を示すのに対し、非吸着タイプの増粘剤の場合、チクソトロピー性を有したレオロジー曲線が得られた。さらに流動性とレオロジー特性の関係を調べる

ために増粘剤添加によるモルタルの見掛け粘度と降伏値への影響を図-9、10に示した。図-9、10より、非天然高分子(F)が天然多糖高分子(A)に比べ優れた増粘作用を有すると共に、増粘剤の添加量増大に伴う降伏値の上昇が小さいことが分かった。

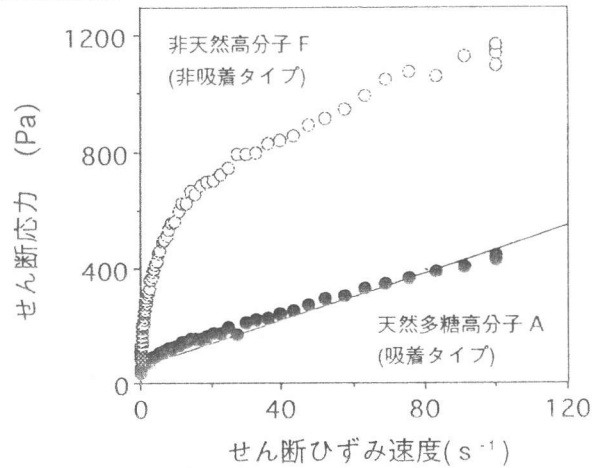


図-8 増粘剤モルタルのレオロジー曲線

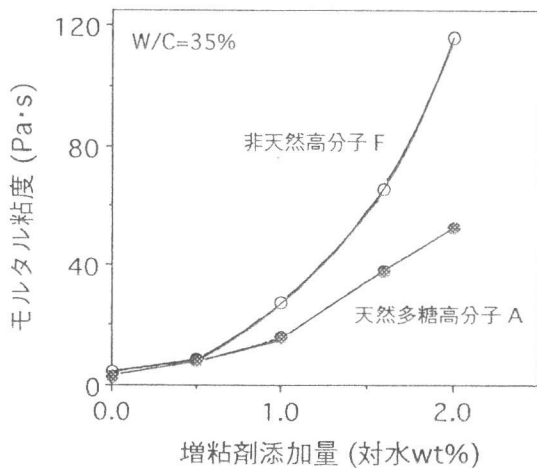


図-9 増粘剤の添加量とモルタル粘度

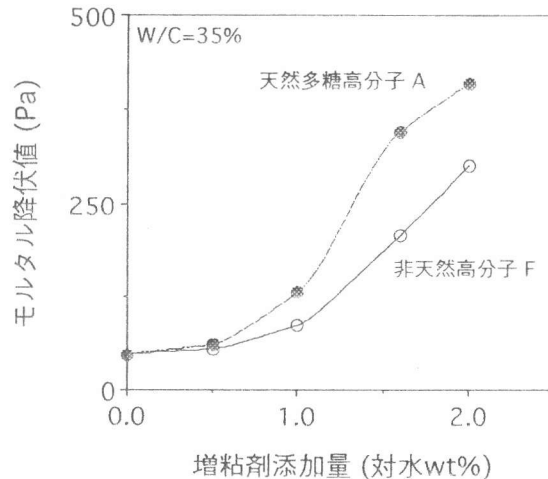


図-10 増粘剤添加量とモルタル降伏値

モルタル粘度と流動性の相関性を調べた結果を図-11に示した。モルタル粘度が5 Pa·s付近では、両者共モルタルフロー300 mm程度の高い流動性を有しているが、吸着タイプの増粘剤を添加したモルタルでは粘度の増大と共に急激な流動性の低下が認められた。

一方、非吸着型増粘剤を添加したモルタルではモルタル粘度を120 Pa·sまで上げてほとんど流動性の低下は認められなかった。この現象は増粘機構の違いを反映していると考えられる。即ち、非吸着タイプの増粘剤はセメント表面との相互作用がほとんどないため、粒子の分散状況に影響を及ぼさずに分子の絡みだけによって水の粘度を上げる増粘機構であるのに対し、吸着タイプの増粘剤の場合はセメント表面との相互作用を有するため、分子の絡み以外に吸着した粒子間で架橋構造の形成を伴う増粘機構であると推察される。そのため、吸着タイプの増粘剤は増粘と共に粒子間の凝集を引き起こし、流動性が低下すると考えられる。

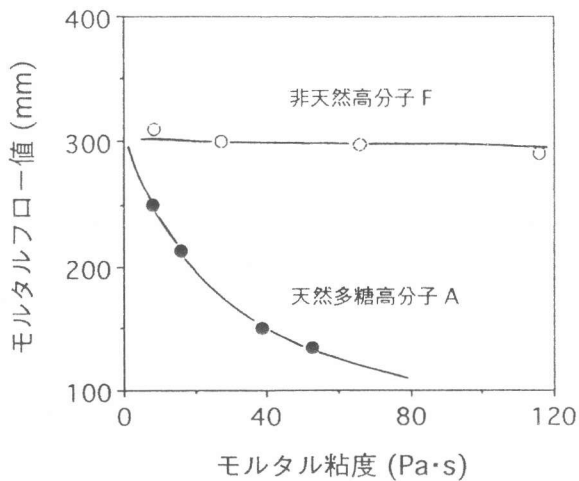


図-1 1 増粘剤添加モルタルの粘度と降伏値

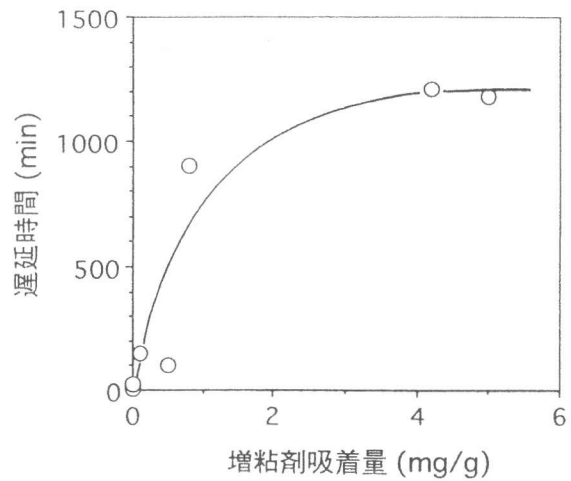


図-1 2 増粘剤の吸着量と遅延性

以上の結果より、非吸着タイプの増粘剤を用いることで、モルタル見掛け粘度が高い条件下においても高い流動性を維持できることが分かった。ただ、実際の高流動コンクリートを設計するには、モルタル粘度や単位モルタル量の最適化 [4]、[5] が必要となってくる。これらの条件を満たすことで、単位結合材量 500 kg/m^3 以下で高い材料分離抵抗性を有した高流動コンクリートの製造が可能になると考えられる。

また、増粘剤のセメントに対する吸着量が低減するため、増粘剤によるセメント水和反応への悪影響の緩和も期待される。カロリーメータでセメントの第2発熱ピーク時間を測定し、増粘剤の種類 (A~G) の違いによる水和反応の遅延時間を求めた結果を図-1 2 に示した。非吸着タイプの増粘剤の場合、ほとんど水和反応への影響は認められなかった。このことから、増粘剤を用いた場合の懸案事項の1つであるコンクリートの硬化遅延も非吸着タイプの増粘剤を用いることで抑制されることが示唆された。

4. まとめ

微粉末や増粘剤等の混和材の特性によるペースト・モルタルのレオロジー特性および流動性への影響を検討した。その結果、モルタル系においてセメントに吸着しない増粘剤を用いることでより見掛け粘度が高い条件下で ($120 \text{ Pa}\cdot\text{s}$)、高流動性を維持できることが分かった。今後、このモルタルを高流動コンクリートに適用することで、現状の単位結合材料の低減を検討する。

(参考文献)

- [1] 岡村 甫、前川宏一、小澤一雅：ハイパフォーマンスコンクリート、技報堂出版、1993
- [2] 超流動コンクリート研究委員会：超流動コンクリート研究委員会報告書(1)、日本コンクリート工学協会、1993. 5
- [3] 吉野 公ほか：高流動コンクリートの流動性評価に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 15、No. 1、pp. 119-124、1993
- [4] 名和豊春ほか：高流動コンクリートの配合と流動性に関する一考察、コンクリート工学年次論文集、Vol. 14、No. 1、pp. 369-374、1992
- [5] 新藤竹文、松岡康訓、S. Tangtermsirkul、坂本 淳：超流動コンクリートの基礎物性に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 13、No. 1、pp. 179-184、1991