

高流動コンクリートのコンシステンシーとレオロジー特性

EXPERIMENTAL STUDY ON CONSISTENCY AND RHEOLOGY OF HIGH-FLUIDITY CONCRETE

高橋秀樹*・周建東**・山田優***

by Hideki TAKAHASHI, Jiandong ZHOU, and Masaru YAMADA

1. はじめに

高流動コンクリートの流動性、分離抵抗性などのフレッシュ時の性状は、使用材料と配合により変化するが、材料特性であるコンシステンシーやレオロジー特性によって、ある程度定量化できる¹⁾。また、コンシステンシー試験による評価値とレオロジー特性を関連づけることができれば、スランプフロー試験や漏斗試験などコンシステンシー試験による評価値が、材料的性質の意味の明確なレオロジー特性によって定量化できる²⁾。

本論文では、使用材料や配合が高流動コンクリートのコンシステンシーとレオロジー特性に及ぼす影響を、さらに、コンシステンシーとレオロジー特性との関係を検討した³⁾。

また、粉体系および増粘剤系高流動コンクリートでは、流動特性の違いがある⁴⁾と想定されるので、粉体系と増粘剤系の流動特性の比較および粉体系の中でも粉体の種類や量の違いが流動特性に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

高流動コンクリートには、高性能A E減水剤を比較的多量に使用し、流動性を付与する点は共通であるが、材料の分離抵抗性を高める方法から、粉体量を多く使用する粉体系、通常のセメント量に増粘剤を添加する増粘剤系、さらに品質変動を抑制できるということから、粉体量を比較的多量使用する他に増粘剤も添加する併用系の3種類がある。

なお、本論文では、粉体系は粉体としてセメントのみを使用する場合を粉体1成分系とし、水和熱を低減したり、流動性を向上させるため普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末やフライアッシュ

など混和材を添加する場合を粉体2成分系とした。使用材料を表1に示す。

表1 使用材料

材料	種類	記号	物性・成分
セメント	低熱ポルトランドセメント	HF	比重3.20、比表面積4,160cm ² /g
	普通ポルトランドセメント	NP	比重3.16、比表面積3,370cm ² /g
混和材	高炉スラグ微粉末	SG	比重2.91、比表面積6,070cm ² /g
	フライアッシュ	FA	比重2.31、比表面積3,220cm ² /g
細骨材	陸砂：大井川水系	S	表乾比重2.59、吸水率2.15%、粗粒率2.73
粗骨材	砕石2005：青梅産	G	表乾比重2.65、吸水率0.72%、粗粒率6.63
混和剤	高性能A E減水剤	SP	ポリカルボン酸系
	増粘剤	V	セルロース系

2.2 実験計画

(1) 粉体1成分系

セメントとして低熱型セメントを使用した。このセメントは、水和熱が低いことを利用してダムなどのマスコンクリート用として開発されたものであるが、初期強度の発現が小さいため、通常のコンクリートとしては利用されにくかった。しかし、低水セメント比のコンクリートに使用すれば、流動性に優れかつ水和発熱が低く温度ひび割れの危険性を小さくすることができるため、平成9年の低熱ポルトランドセメントのJIS化に伴い、今後、高強度や高流動コンクリートに適用するには有効と考えられる。

基準配合を表2に示す。この配合を基準にして、粉体量、水量、細骨材率、高性能A E減水剤量をそれぞれ3水準に変化させ、各要因の影響を検討した。

*西松建設(株)技術研究所土木技術研究課 (〒242-8520 神奈川県大和市下鶴岡 2570-4)、

**工学院大学客員研究員 工学部建築学科、

***大阪市立大学教授 工学部環境都市工学科

表2 基準配合

種類	水セメント比 W/C(%)	細骨材率 s/a(%)	単位量(kg/m ³)						高性能AE 減水剤 (C×%)
			セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材 G	混和材 (SG, FA)	増粘剤 (W×%)	
粉体1成分系	32.3	50.0	525	170	805	822	—	—	1.5
増粘材系	50.0	52.3	360	180	896	835	—	0.2	1.7
粉体2成分系	32.4	50.0	367	170	793	811	158 (SG30%)	—	1.2
	32.4	50.0	472	170	780	792	53 (FA10%)	—	1.2

目標コンシステンシー：スランプフロー60～65cm V65 漏斗流下時間10～15秒
U形充てん高さ（流動障害条件R2）30cm以上

(2) 増粘剤系

増粘剤（分離低減剤）は、セルロース系の水溶性高分子、ポリアクリルアミド系水溶性高分子、発酵技術により製造される多糖類ポリマー（バイオポリマー）の3種類に分類されるが、本研究では粉体系配合とのコンシステンシーやレオロジー特性の比較を主目的とするため、一般的に使用されるセルロース系の増粘剤で配合を検討した。

この種類については、セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、粉体系と同様に各要因3水準で影響を検討した。また、増粘剤量についても、3水準(W×0.15%、W×0.2%、W×0.25%)とした。

(3) 粉体2成分系

高流動コンクリートの混和材として一般的に使用されている高炉スラグ微粉末とフライアッシュを用い、これら混和材の種類・量がコンシステンシーおよびレオロジー特性に及ぼす影響を調べるため、混入比率をパラメータとした実験を行った。なおセメントには、普通ポルトランドセメントを用いた。

基準配合を表2に示す。粉体量は1成分系に併せて一定(525kg/m³)とした。混和材重量置換率については、高炉スラグ微粉末が30%、50%、70%、フライアッシュは10%、30%、50%の各3水準とした。

2.3 実験方法

(1) 実験順序

①予備試験から、目標のコンシステンシーが得られる基準配合を決定した。(表2参照)

②基準配合から、配合要因の単位粉体量、水量、骨材量、高性能AE減水剤量、増粘剤量などの各パラメータを変化させた配合試験を実施し、配合要因によるコンシステンシーおよびレオロジー特性の変動を調べた。

③上記配合試験におけるコンクリートの配合から

粗骨材を除いたモルタルすなわちウエットスクリーンしていないモルタルのレオロジー特性を試験し、高流動コンクリートの所要のコンシステンシーを満足するモルタルのレオロジー特性を求めた。

(2) 試験方法

コンクリートの練混ぜには、強制2軸練りミキサ（容量100ℓ）を用い、各回60ℓを練り混ぜた。

セメントや骨材などの固体粒子を一括投入して30秒空練りした後、水と高性能AE減水剤を加えて90秒間練混ぜ、練置き5分後に排出して、次に示す各試験を実施した。カッコ内に試験に必要な試料の量を示す。

①スランプフロー試験（約7ℓ）

土木学会「高流動コンクリート施工指針」（以下、「施工指針」と略す）の試験方法（土木学会規準）案の「スランプフロー試験方法」により、スランプフローおよび50cmフロー到達時間の測定を行った。

②V65漏斗流下試験（約10ℓ）

「施工指針」の試験方法（土木学会規準）案のうち、「漏斗を用いた流下試験方法」のV形の漏斗（漏斗口先：65×75mm）により流下時間の測定を行った。

③空気量試験（約7ℓ）

JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法（空気室圧力方法）」によった。

④コンクリート温度

棒状アルコール温度計を用いて測定した。

⑤U形充てん試験（約17ℓ：流動障害条件R2）

「施工指針」の試験方法（土木学会規準）案のうち、「U形充てん装置を用いた間隙通過性試験方法」により、充てん高さおよび充てん停止時間の測定を行った。

⑥レオロジー特性試験（約12ℓ）

二重円筒型（外円筒回転式）の回転粘度計を用い、角速度・トルク値からせん断応力とひずみ速度の関係を求め、レオロジー特性の降伏値と塑性粘度を算

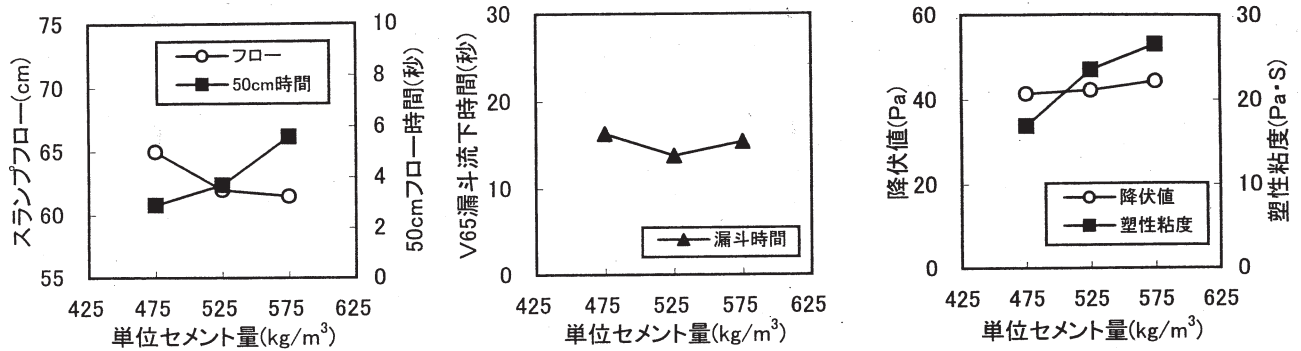


図1 粉体1成分系高流動コンクリートの流動特性と単位セメント量との関係

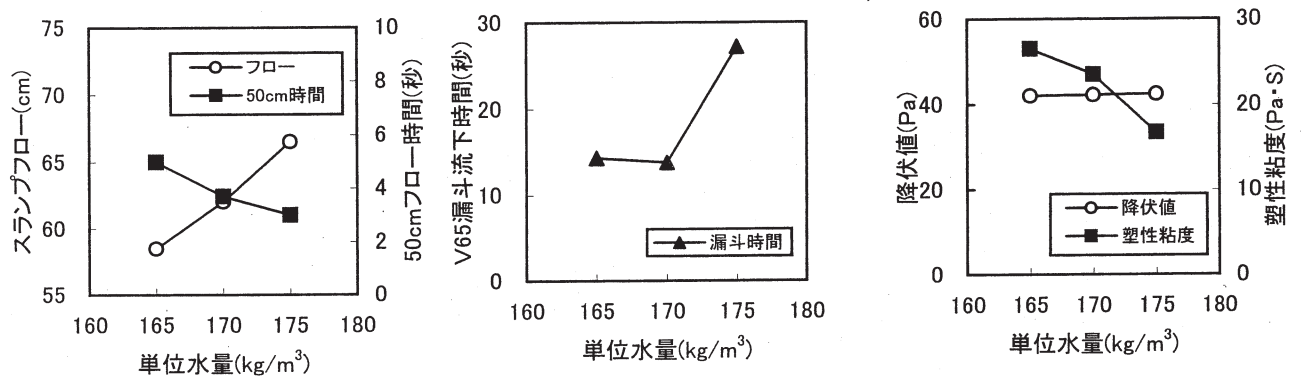


図2 粉体1成分系高流動コンクリートの流動特性と単位水量との関係

出した。

なお、モルタルのコンシステンシー試験はフロー試験(0打)、モルタル用V漏斗流下試験を行い、またB型粘度計を用い、レオロジー特性を求めた。

3. 実験結果と考察

3.1 配合要因がコンシステンシーとレオロジー特性に及ぼす影響について

(1) 粉体1成分系

粉体1成分系高流動コンクリートの流動特性(コンシステンシーとレオロジー特性)と単位セメント量との関係を図1に、単位水量との関係を図2に示す。

単位セメント量が多くなるほど、スランプフローが小さくなり、50cmフロー到達時間は長くなる傾向を示したが、V65漏斗流下時間はほとんど変化しなかった。また、コンクリートのレオロジー特性については、単位セメント量が多くなるほど降伏値が若干高くなり、塑性粘度も高くなった。したがって、単位セメント量が多くなると、水和に必要な水を多く必要とするため、粘度が高くなり、施工軟度は小さくなると考えられる。

一方、コンクリートのコンシステンシーは、単位水量が多くなるほど、スランプフローが大きくなり、50cmフロー到達時間およびV65漏斗流下時間は短く

なる傾向を示した。ただし、単位水量175kg/m³の場合には、粗骨材のアーチングによる閉塞現象が見られ、V65漏斗流下時間は長くなった。またレオロジー特性については、塑性粘度は低下し、降伏値はわずかに高くなった。したがって、単位水量が増えると水和に必要な水量以上の余剰水が多くなることにより、粘度が低くなり、施工軟度が大きくなる。

粗骨材を除いたモルタルの流動特性と単位セメント量との関係を図3に、単位水量との関係を図4に示す。モルタルのコンシステンシー・レオロジー特性ともコンクリートの傾向と同じであるが、より顕著な傾向を示した。

(2) 増粘剤系

増粘剤系高流動コンクリートの流動特性と単位水量との関係を図5に、増粘剤使用量との関係を図6に示す。コンクリートのコンシステンシーについては、単位水量が多くなるほど、スランプフローが大きくなり、50cmフロー到達時間が短くなる傾向が見られた。V65漏斗流下時間は粗骨材の影響で明確な傾向は見られなかった。この原因としては、粗骨材のアーチング作用による閉塞現象や試験が3水準と少ないことなどが考えられる。レオロジー特性は、単位水量が多くなると粘度が低くなることから、降伏値、塑性粘度とも低くなる傾向を示した。一方、増粘剤

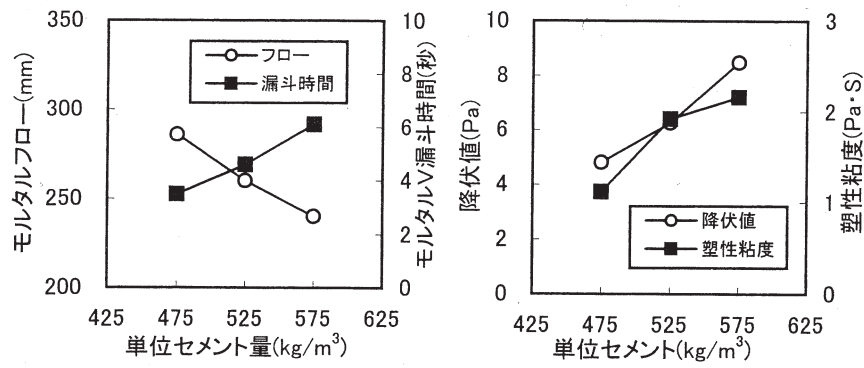


図3 モルタルの流動特性と単位セメント量との関係(粉体1成分系)

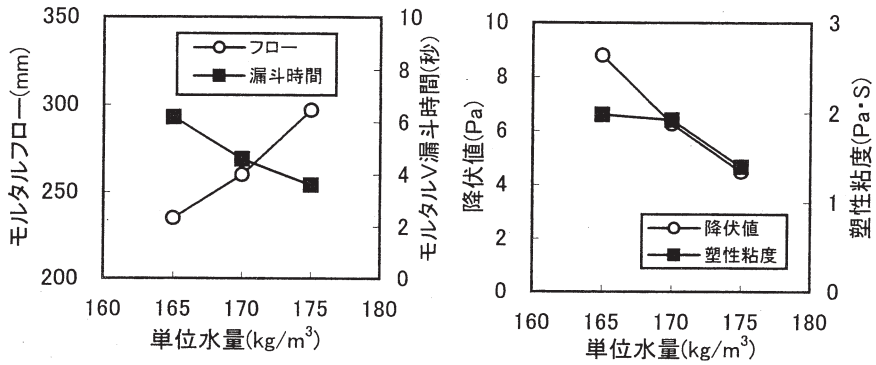


図4 モルタルの流動特性と単位水量との関係(粉体1成分系)

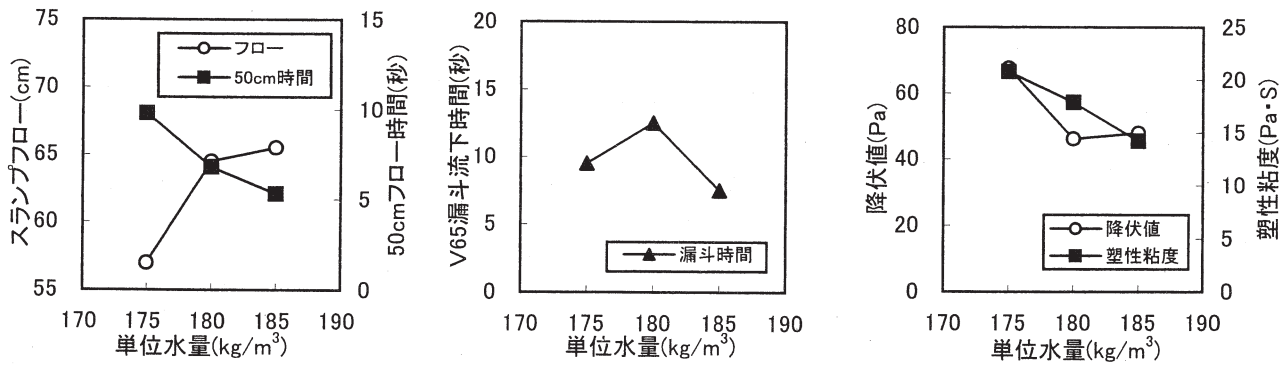


図5 増粘剤系高流動コンクリートの流動特性と単位水量との関係

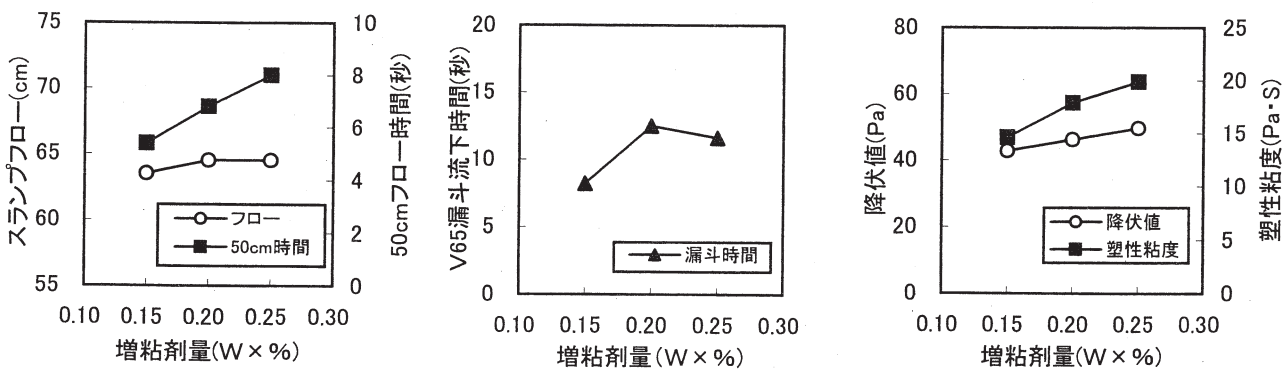


図6 増粘剤系高流動コンクリートの流動特性と増粘剤使用量との関係

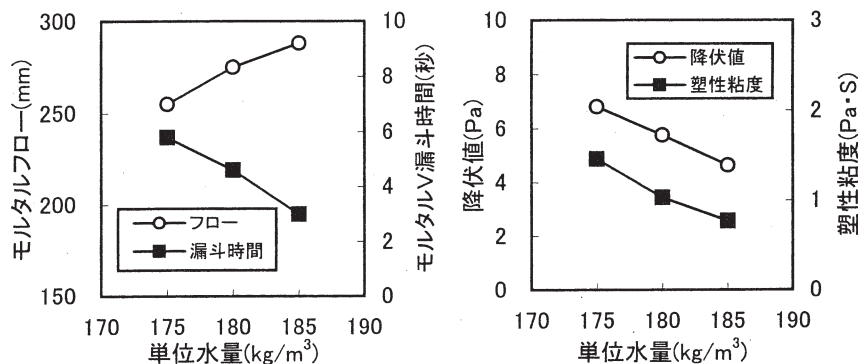


図7 モルタルの流動特性と単位水量との関係(増粘剤系)

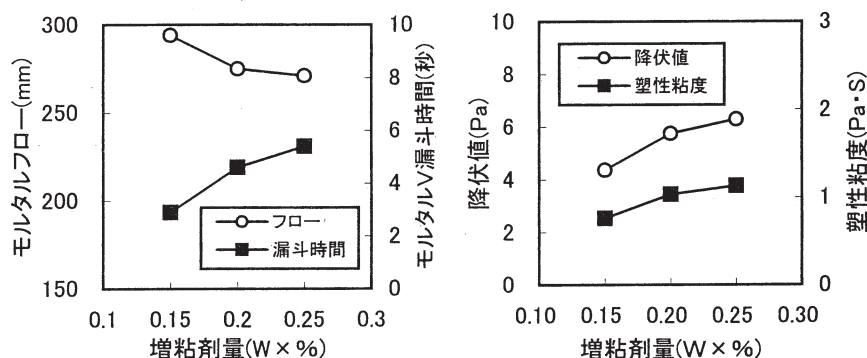


図8 モルタルの流動特性と増粘剤使用量との関係(増粘剤系)

使用量の増減は、スランプフローに及ぼす影響は少なく、増粘剤使用量が増えると、スランプフローはわずかに大きくなり、50cmフロー到達時間およびV65漏斗流下時間は長くなる傾向を示した。レオロジー特性については、増粘剤の使用量が増えると降伏値、塑性粘度とも高くなる傾向を示した。したがって、増粘剤使用量が増えると、増粘効果により、粘度が高くなり、施工軟度も小さくなるものと考えられる。

増粘剤使用量が増えると、粘性が高くなるが、スランプフローが若干大きくなった原因については、増粘剤量の変動幅が小さかったことや増粘剤による材料分離抵抗性の向上によって、コンクリートの品質変動を抑制する作用などが考えられる。

増粘剤系高流動コンクリートのモルタルの流動特性と単位水量との関係を図7に、増粘剤使用量との関係を図8に示す。モルタルのコンシステンシーもコンクリートと同様に、単位水量が多くなるほど、フローが大きくなり、V漏斗流下時間は短くなった。レオロジー特性も、単位水量が多くなるほど、降伏値が低くなり、塑性粘度も低くなった。モルタルのコンシステンシーは、コンクリートと異なり、増粘剤使用量が増えると、粘度が高くなるため、フローは小さくなり、V漏斗流下時間は長くなる傾向を示し

た。また、モルタルのレオロジー特性については、増粘剤使用量が多くなると、降伏値が高くなり、塑性粘度も高くなる傾向を示した。

3. 2 混和材の種類および置換率がコンシステンシーとレオロジー特性に及ぼす影響について

高炉スラグ微粉末およびフライアッシュなど混和材のセメントとの置換率が、高流動コンクリートのコンシステンシーとレオロジー特性に及ぼす影響について調べた。

高炉スラグ微粉末の置換率(重量)は、30%、50%、70%とし、置換率30%で目標コンシステンシーを満足する高性能AE減水剤量を決定し、他の比率もその添加量で実施した。コンクリートの流動特性と高炉スラグ置換率との関係を図9に示す。高炉スラグ微粉末の置換率が高くなるほど、スランプフローは大きくなり、V65漏斗流下時間は若干長くなる傾向を示したが、50cmフロー到達時間は短くなる傾向を示した。また、レオロジー特性については、置換率が高くなると、降伏値、塑性粘度とも低くなる傾向にあった。

フライアッシュの置換率(重量)は、10%、30%、50%とし、置換率が10%の場合において、高炉スラ

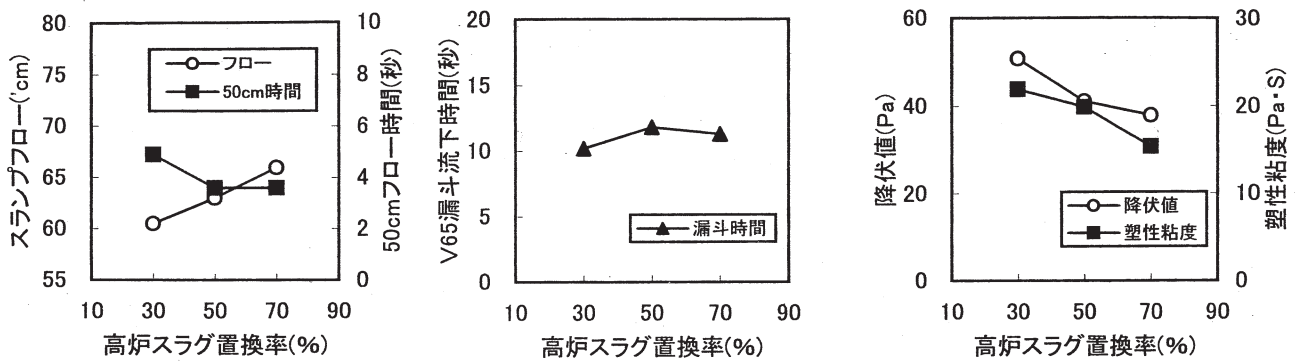


図9 粉体系高流動コンクリートの流動特性と高炉スラグ置換率との関係

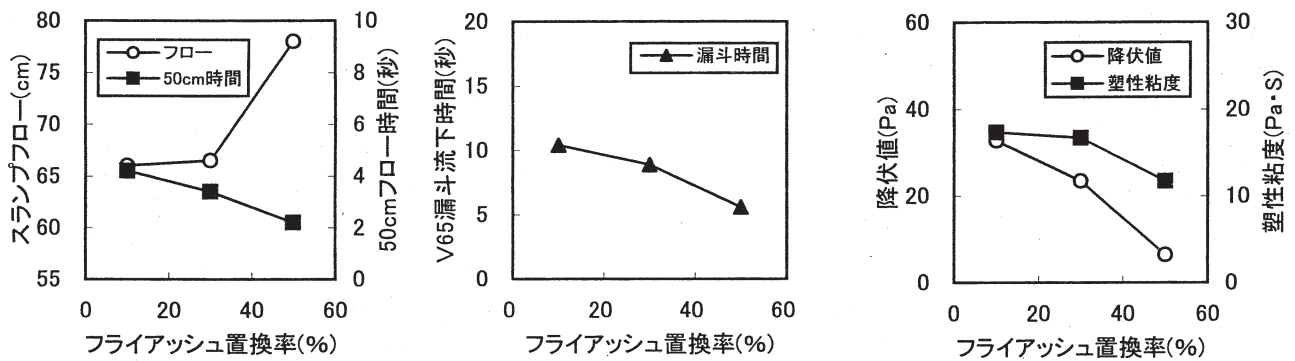


図10 粉体系高流動コンクリートの流動特性とフライアッシュ置換率との関係

グ微粉末で決定した高性能AE減水剤量で、目標のコンシステンシーが得られることを確認して、試験を実施した。コンクリートの流動特性とフライアッシュ置換率との関係を図10に示す。フライアッシュの置換率が高くなるほど、スランプフローが大きくなり、50cmフロー到達時間およびV65漏斗流下時間は短くなる傾向を示した。またレオロジー特性については、置換率が高くなるほど、降伏値、塑性粘度とも低くなった。

以上のとおり、粉体を混和材として使用することにより、高流動コンクリートのワーカビリティを改善することが可能である。ただし、改善効果は粉体の種類により異なる。

3.3 高流動コンクリートのコンシステンシーとレオロジー特性との関係

高流動コンクリートの試験結果から、コンシステンシーとレオロジー特性との関係を調べた。高流動コンクリートの配合種別によるコンシステンシー試験結果(スランプフロー、50cmフロー到達時間)とレオロジー特性(降伏値、塑性粘度)との関係を図11に示す。

図から見られるように、コンクリートのスランプフローと降伏値は、相関係数0.6以上であった。V65

漏斗流下時間と塑性粘度は、相関関係はほとんど見られず、特に粉体1成分系はV65漏斗試験で粗骨材がアーチングを生じて閉塞した。一方、50cmフロー到達時間と塑性粘度は比較的高い相関関係が見られた。

粗骨材を除いたモルタルのコンシステンシーとレオロジー特性との関係を図12に示す。モルタルフローと降伏値の関係は、相関係数0.9以上の高い相関が見られた。また、モルタルは、コンクリートとは異なり粗骨材がないことから、漏斗試験で閉塞することがないため、モルタルV漏斗流下時間と塑性粘度の関係も相関係数0.8以上とかなり高い相関性があった。

以上のとおり、コンシステンシー試験結果とレオロジー試験結果の間にはある程度の相関関係があり、品質管理において最低限レオロジー特性とコンシステンシーのどちらかを試験すればよいと言える。

3.4 高流動コンクリートの流動特性とモルタルの流動特性の関係について

高流動コンクリートのコンシステンシーとモルタルのレオロジー特性の関係を調べ、モルタルのレオロジー特性から高流動コンクリートのコンシステンシーの評価方法を検討した。

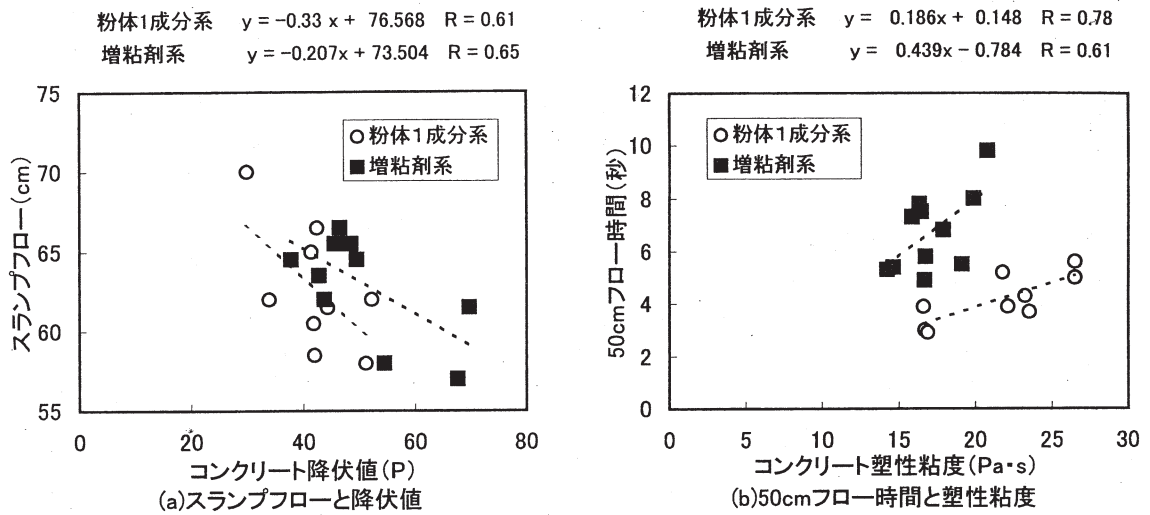


図11 コンクリートのコンシステンシーとレオロジー特性との関係

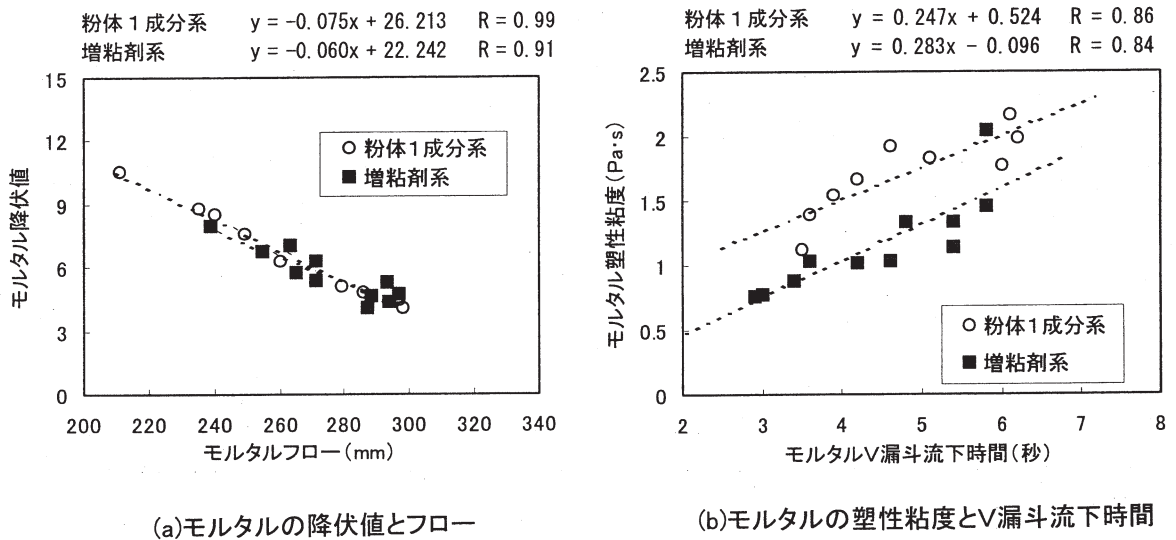


図12 モルタルのレオロジー特性とコンシステンシーとの関係

高流動コンクリートのコンシステンシー試験値(スランプフロー、50cmフロー到達時間)とモルタルのレオロジー特性(降伏値、塑性粘度)との関係を図13および図14に示す。図から見られるように、粉体1成分系高流動コンクリートのスランプフローとモルタル降伏値の相関係数は0.88と比較的高く、コンクリートのスランプフローはモルタルの降伏値からの推定が可能と考えられる。50cmフロー到達時間とモルタル塑性粘度の相関係数は0.81であった。増粘剤系の場合はばらつきが大きい、ある程度の相関関係が見られた。

一方、コンクリートのスランプフローとモルタルフローとの関係を図15に、50cmフロー到達時間とモルタルV漏斗流下時間との関係を図16に示す。これ

らの図から見られるように、コンクリートのコンシステンシーとモルタルのコンシステンシーがかなり高い相関関係を示した。したがって、実務的に考えると、現場ではモルタルのコンシステンシーあるいはレオロジー特性を管理することにより、高流動コンクリートのコンシステンシーを推定することが可能である。

4. まとめ

今回の実験範囲において、各要因が高流動コンクリートの流動特性に与える影響およびモルタルとコンクリートの流動特性についてある程度把握できた。

まとめると下記のとおりである。

- 1) 単位セメント量が多くなるほど、水和に必要な

粉体1成分系 $y = -1.486x + 72.602$ $R = 0.88$
 増粘剤系 $y = -1.357x + 70.786$ $R = 0.53$

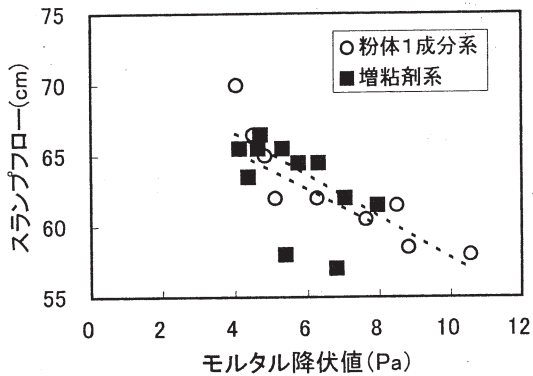


図13 スランプフローとモルタル降伏値

粉体1成分系 $y = 2.398x + 0.069$ $R = 0.81$
 増粘剤系 $y = 2.221x + 4.154$ $R = 0.55$

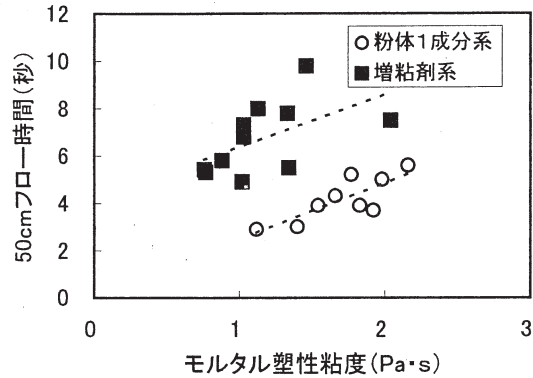


図14 50cmフロー時間とモルタル塑性粘度

粉体1成分系 $y = 0.1151x + 32.549$ $R = 0.90$
 増粘剤系 $y = 0.1098x + 32.918$ $R = 0.65$

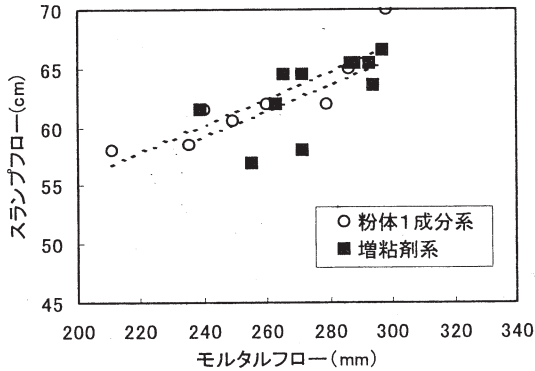


図15 コンクリートのスランプフローとモルタルフローの関係

粉体1成分系 $y = 1.0488x + 2.0741$ $R = 0.76$
 増粘剤系 $y = 0.7868x + 0.3902$ $R = 0.91$

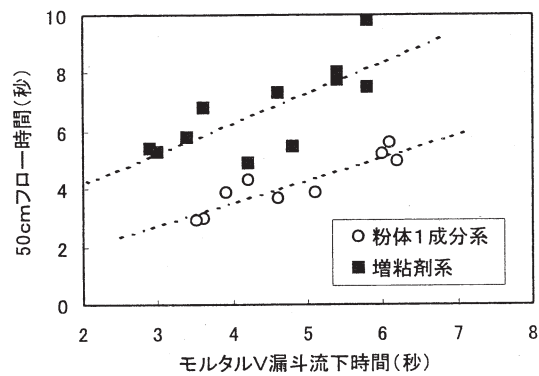


図16 コンクリートの50cmフロー時間とモルタルV漏斗流下時間の関係

水を多く必要とするため、粘度が高くなり、施工軟度は小さくなる。

- 2) 単位水量が増えると水和に必要な水量以上の余剰水が多くなることにより、粘度が低くなり、施工軟度が大きくなる。
- 3) 増粘剤の使用量が増えると、増粘効果により、粘度が高くなり、施工軟度も小さくなる。
- 4) 高炉スラグ微粉末の置換率が高くなると粘度が若干低く、施工軟度も若干大きくなり、置換率が高くなるほど施工性が改善される。
- 5) フライアッシュの置換率が高くなるほど、コンクリート・モルタルとも粘度が低くなり、施工軟度も大きくなり、施工性が改善される。
- 6) 高流動コンクリートの降伏値からスランプフローを、塑性粘度から50cmフロー到達時間を評価することができる。
- 7) モルタルのフロー値からコンクリートのスランプフローを、モルタルのV漏斗流下時間からコ

ンクリートの50cmフロー到達時間を推定できる。また、モルタルの降伏値から、コンクリートのスランプフローを、モルタルの塑性粘度から50cmフロー到達時間を推定できる。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書(Ⅱ)、pp. 1-94、1994. 5
- 2) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書(Ⅰ)、pp. 1-126、1993. 5
- 3) 高橋秀樹、増田修一：高流動コンクリートおよびモルタルのコンシステンシーとレオロジー特性、土木学会第53回年次学術講演会講演概要集、V-243、pp. 486~487、1998. 10.
- 4) 河井 徹、吉川章三、鳥羽保行、杉橋直行、村上邦夫：タイプ別高流動コンクリートの性能比較に関する実験的研究、高流動コンクリートシンポジウム論文報告集、pp. 77-80、1996. 3

(2000年1月11日受付 2000年5月12日受理)