

論文 新規の特殊増粘剤が低セメント量の領域で高い流動性と材料分離抵抗性を両立できるメカニズムに関する基礎的検討

小西 秀和^{*1}・桜井 邦昭^{*2}・山川 勉^{*3}

要旨：新規の特殊増粘剤と市販の高性能 AE 減水剤の組合せにより、低セメント量の高流動コンクリートを開発し、その実用性を確認している。このコンクリートの特性として、単位セメント量が少ない領域においても、高い流動性と材料分離抵抗性を両立できていることが挙げられる。この理由について、レオロジー定数を用いて、メカニズムを検討した。その結果、新規の特殊増粘剤は、コンクリートに使用実績のある他の増粘剤と比較し、セメント系で高い増粘効果を有すること、増粘剤の混入に伴う降伏値の過度な上昇を抑えつつ、必要な塑性粘度を確保でき、低セメント量でも高流動コンクリートが製造できることを確認した。

キーワード：高流動コンクリート、セルロースエーテル、レオロジー、粘着力、材料設計

1. はじめに

高流動コンクリートは、施工の省力化や生産性向上が行えるコンクリートであるが、我が国ではあまり普及していない現状にある。その理由の一つとして、粉体量の増加による材料費の上昇が挙げられる。粉体系高流動コンクリートでは 500kg/m³ 程度、増粘剤系高流動コンクリートでは 400kg/m³ 程度の粉体量が必要とされている。筆者らはこのような状況を鑑み、新規の特殊増粘剤と汎用的な高性能 AE 減水剤を用いることで、低セメント量の高流動コンクリートを開発し、実構造物に適用した¹⁾。

本研究では、開発した低セメント量の高流動コンクリートに関して、高い流動性と材料分離抵抗性が両立できるメカニズムを明らかにすることを目的とし、モルタルレベルにおいてレオロジー定数を測定した結果について述べる。

2. 新規の特殊増粘剤の概要

本研究で用いた新規の特殊増粘剤（以下、VMA1 という）は、水溶性セルロースエーテル（以下、CE という）系増粘剤であり、各種モルタル・コンクリートに増粘剤などとして利用されている。その分子量と添加量に関して、式(1)及び式(2)の実験式が提案されている²⁾。

$$A \propto K \times (M^{0.67} \times C^{1.0}) \quad (1)$$

$$\text{又は } A \propto K \times \{1/(M^{0.67} \times C^{1.0})\} \quad (2)$$

ここに、A：コンクリートの特性値〔鉄筋通過率（高流動コンクリート）、水中気中強度比（水中不分散性コンクリート）、粉塵濃度（吹付けコンクリート）等〕、K：コンクリートの特性値によって決定される実験定数、M：CE の重量平均分子量〔 $\times 10^4$ g/mol〕、C：CE の添加量〔セメント×%〕

つまり、CE は、その重量平均分子量、添加量、化学

構造などからコンクリートの特性値を調整できるという、材料設計に適した物質であると言える。

CE は、これまで、材料分離抵抗性の改善やブリーディング低減を目的として、増粘剤系の高流動コンクリート等に使用されていた。しかし、従来の CE は、添加量の増加に伴い、材料分離抵抗性を付与できるが、流動性が低下する場合があります。単位水量や減水剤の添加量を増加して、流動性を確保してきた。これに対し、VMA1 では、相反する特性である、高い流動性と材料分離抵抗性の両立ができることが特徴である。

VMA1 を添加した高流動コンクリート及び粉体系高流動コンクリートのフレッシュ性状に関して、文献 1) の結果を図-1 に示す。単位水量が一定の条件下では、粉体系高流動コンクリートは水セメント比が 45～50% 以上になると自己充填性が確保できないのに対し、VMA1 を添加した場合は、水セメント比が 65% という低セメント量の領域でも自己充填性が得られている。また、市販の増粘剤を含んだ一液型減水剤（以下、VSP という）よりも、低セメント量での自己充填性等の点で優れている。

高い流動性と材料分離抵抗性が両立できる要因は十分に明らかでないことから、本報では、レオロジー定数等を用い、そのメカニズムを検討した。

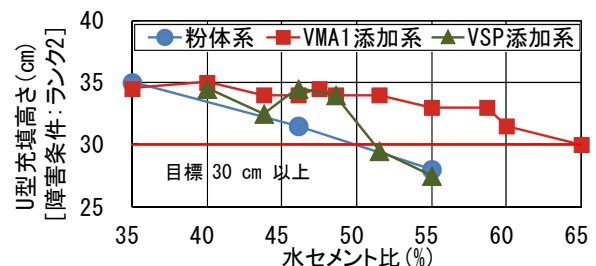


図-1 水セメント比と充填高さ（ランク 2）の関係¹⁾

*1 信越化学工業（株）合成技術研究所 研究部開発室 工修（正会員）

*2 （株）大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博士（工学）（正会員）

*3 信越化学工業（株）合成技術研究所 研究部開発室 主席研究員 博士（工学）（正会員）

表-1 実験概要

シリーズ	評価項目	対象	増粘剤の種類	増粘剤の添加量	W/C
1	レオロジー	水溶液	VMA1～5	$W \times 0.098$ 及び 0.196%	—
		セメントペースト	VMA1～5	$W \times 0.034, 0.068, 0.102\%$	50%
2	ブリーディング	モルタル	VMA1	0 及び 88g/m^3	35～55% (5%刻み)
3	モルタルの一体性に関する評価				

3. 実験概要

実験概要を表-1、使用材料を表-2 に示す。実験はシリーズ 1, 2, 3 に分けて行った。

3.1 レオロジーの評価（シリーズ 1）

新規の特殊増粘剤（VMA1）が、少量の添加で高い流動性と材料分離抵抗性を両立できることを明らかにすることを目的として、各種増粘剤（VMA1～5）のレオロジー評価を、水溶液及びセメントペーストで実施した。次に、モルタルレベルにおいて、VMA1 の添加の有無について、レオロジー評価を行った。

（1）水溶液のレオロジー評価方法

増粘剤には VMA1 とコンクリートに使用実績のある既存の 4 種類の増粘剤（VMA2～5）を用いた。増粘剤はコンクリート中の自由水に溶解し、その機能を発揮すると考えられる。そのため、自由水に基づいて増粘剤濃度を設定した。文献 3）に従い自由水量の算出を行ったところ、単位水量における自由水の割合は 35%と算出された。

増粘剤の濃度は文献 1）において、実施に供した低セメント量の高流動コンクリートに使用した VMA1 の添加量（ 60g/m^3 ）から、単位水量 175kg/m^3 中の自由水量（ $175\text{kg/m}^3 \times 0.35 = 61.25\text{kg/m}^3$ ）で除し、 0.098% とした。また、上述のコンクリート配合において、 120g/m^3 に相当する増粘剤濃度である、 $W \times 0.196\%$ においても評価を実施した。VMA2～5 についても、低添加量で効果がある VMA1 との比較を行うことを目的とし、同じ増粘剤濃度で試験を行った。

水溶液の調製にはイオン交換水を使用した。CE 系である VMA1 及び VMA2 は、水に入れると表面だけが水に濡れて溶解した凝集粒を生じるため、溶解しない 90°C の熱水に均一に分散させ、その後、攪拌しながら冷却することで均一な水溶液を得た。VMA3, 4, 5 は、常温のイオン交換水に分散させ、攪拌しながら完全に溶解させ、均一な水溶液を調製した。

測定条件を表-3 に示す。見かけ粘度は、BM 型粘度計で 60rpm に相当するずり速度の値とした³⁾。

（2）セメントペーストのレオロジー評価方法

測定条件を表-4 に示す。VMA の添加量は $W \times 0.034$,

表-2 使用材料

材料	記号	種類・物性・主成分
セメント	C	普通ポルトランドセメント、 密度； 3.16g/cm^3
細骨材	S	陸砂、表乾密度； 2.61g/cm^3 吸水率；1.64%、粗粒率；2.46
水	W	上水道水
混和剤	VMA1	新規の特殊増粘剤 (セルロースエーテル系)
	VMA2	従来のセルロースエーテル
	VMA3	ウェランガム
	VMA4	ダイユータンガム
	VMA5	ポリアクリルアミド
	SP	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系)
	AE	AE 剤 (陰イオン界面活性剤系)

表-3 水溶液のレオロジー測定条件

センサー	$\phi 60\text{mm}$ のコーンプレート (1°)
ずり速度	$0.05 \sim 15 (\text{s}^{-1})$
測定温度	$20 \pm 1^\circ\text{C}$
増粘剤濃度	$W \times 0.098$ 及び 0.196%

表-4 セメントペーストのレオロジー測定条件

センサー	ボブローター (型番 Z20 DIN TiL)
水セメント比	50%
ずり速度	$0.05 \sim 15 \sim 0.05 (\text{s}^{-1})$
測定温度	$20 \pm 3^\circ\text{C}$
VMA 濃度	$W \times 0.034, 0.068, 0.102\%$
レオロジー定数の計算	ずり速度 $10 \sim 0.1 (\text{s}^{-1})$ に対して、 casson plot から塑性粘度を算出

$0.068, 0.102\%$ の 3 水準とした。これらの濃度は、コンクリートレベルでの添加量 $60, 120, 180\text{g/m}^3$ を、コンクリート配合の単位水量（ 175kg/m^3 ）で除した値である。また、セメントペーストは、水セメント比 50%とし、VMA は表-2 に示した 5 種類について実施した。

（3）モルタルのレオロジー評価方法

モルタルの配合を表-5 に示す。水セメント比の異な

る 5 配合とし、単位水量 175kg/m³、単位粗骨材量 320L/m³とし、水セメント比を 35～55%と変化させたコンクリート配合から、粗骨材を除いた配合とした。VMA1 添加量は 0 及び 88g/m³の 2 水準とした。88g/m³の根拠としては、文献 1) のコンクリート配合 (VMA1;60g/m³、単位水量;175kg/m³) と表-5 のモルタル配合において、単位水量に対する VMA1 濃度が同等となるよう設定した (0.060/175=0.088/257=0.034%)。また、モルタルフロー (0 打フロー) の目標値は 240±10mm (JIS R 5201)、空気量の目標値は 7±2% (JIS A 1171) とし、それぞれ SP 及び AE の添加量により調整した。目標としたモルタルフローの根拠は、高流動コンクリートのスランプフロー60cm に相当するモルタルフローが約 240mm であることによる⁴⁾。モルタルの練混ぜは、JIS R 5201 に準拠した方法により実施した。レオロジーの測定条件を表-6 に示す。なお、一連のレオロジー評価には、レオメーター (Thermo Fisher Scientific 社製の MARS60) を使用した。

3.2 ブリーディングの評価 (シリーズ 2)

VMA1 添加による材料分離抵抗性の向上効果を確認することを目的として、ブリーディング試験を行った。試験は、JIS A 1123 に準拠した方法により実施した。なお、試験には内径φ125mm、高さ 250mm のブリキ製の軽量型枠を使用した。

3.3 モルタルの一体性に関する評価 (シリーズ 3)

コンクリートを型枠内で均質な状態で充填させるには、モルタルと粗骨材とが一体となって流動し、充填する必要がある。筆者らは、VMA1 は、コンクリートの粘性を過度に増加させず、モルタルと粗骨材との一体性を高める特性を有していると考えている。評価方法としては、目開き 5mm のふるいを使用したコンクリート中のモルタル通過試験及び円盤型治具を用いたモルタルの付着性試験が提案されている⁵⁾。本研究では、より単純な系で一体性を評価することを考え、モルタル自体の一体性について以下に示す 2 種類の試験を行った。

(1) 引き抜き抵抗試験

モルタルへ治具を挿入し、引き抜いたときの抵抗値を粘着力として評価した。測定には、食品などの硬さ・柔らかさ・噛みごたえ等を測定できる Texture Analyzer を使用した。測定例を図-2 に示す。モルタルに治具を挿入する時はプラスの力、引き抜く時はマイナスの力が加わる。具体的には、図-2 における積分値 (赤破線部) を粘着力とした。なお、治具は直径 25mm、長さ 40mm の円柱状、モルタルを充填した容器の寸法は直径 45mm、長さ 60mm の円筒状のものを使用し、モルタルの充填高さは 25mm、モルタルへの挿入深さは 10mm とした。従って、10mm 挿入した際の治具の先端と底面までの距

表-5 モルタル配合

W/C	単位量 (kg/m³)			VMA1
(%)	W	C	S	g/m³
35	257	735	1154	0 及び 88
40	257	643	1229	
45	257	571	1288	
50	257	514	1335	
55	257	467	1374	

表-6 モルタルのレオロジー測定条件

センサー	攪拌羽型ローター (型番 CMC 26F)
ずり速度	0.05～15～0.05 (s ⁻¹)
測定温度	20±3 °C
レオロジー定数の計算	ずり速度 10～0.1 (s ⁻¹) に対して、casson plot から算出

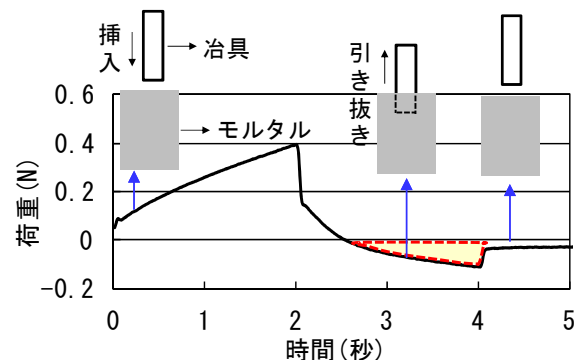


図-2 引き抜き抵抗試験の測定例

離は 15mm、治具と容器の壁面までの距離は 10mm となる。また、治具の挿入・引き抜き速度は 5mm/s とした。配合は表-5 に示すモルタル配合とし、VMA1 の添加量は 0 及び 88g/m³の 2 水準とした。

(2) 振動ふるいによるセメントペーストの通過試験

振動ふるいによるセメントペーストの通過率を評価した。目開き 1.18mm のふるい上にモルタルを 300g 載せ、JIS R 5201 準拠のテーブルバイブレータを使用し、10 秒間加振して、通過したセメントペースト量を測定した。ふるいを通過したセメントペースト量を、モルタル配合中のセメントペースト量で除し、セメントペーストの通過率を算出した。

4. 結果と考察

4.1 レオロジーの評価 (シリーズ 1)

(1) 水溶液及びセメントペーストのレオロジー特性

各種の VMA を添加した水溶液の見かけ粘度の測定結果を図-3 に示す。VMA3 及び VMA4 は天然発酵多糖類であり、特にダイユータンガムである VMA4 は 0.098%という低濃度域であっても、高い見かけ粘度を示すのに対し、CE 系である VMA1 及び VMA2、ポリア

クリルアミドである VMA5 は低い値であった。なお、水溶液の pH は 8 ± 1 の範囲であった。

セメントペーストの塑性粘度の測定結果を図-4 に示す。各濃度に対する塑性粘度は VMA1 が最も高かった。これらの結果を水溶液の見かけ粘度 (VMA 濃度, $W \times 0.098\%$) とセメントペーストの塑性粘度 (VMA 濃度, $W \times 0.034\%$) の関係で整理して図-5 に示す。VMA1 は水溶液の粘性は低い、セメントペーストでは増粘する結果が得られた。この現象に対して、次のメカニズムを考察した。CE は、セメントに吸着し、その吸着特性は CE の化学構造に依存すると報告されているが⁶⁾、VMA1 のセメントペーストでの増粘もセメントへの吸着挙動が関与していると考えている。吸着のイメージ図を図-6 に示す。CE はセメントに吸着するもの、吸着せず自由水を増粘するもの、隣り合うセメントに吸着し橋架け構造及び伸展した分子構造をとるものに分類できると考えられる。図-3 の結果からも明らかなように、VMA1 と VMA2 では VMA1 の方が水溶液の見かけ粘度は高いため、分子鎖は VMA1 の方が長いことが示唆される。そのため、VMA1 の方が多くの橋架け構造をとることができ、また、分子の伸展の効果も大きいと考えられ、このことがセメントペーストにおける増粘の一要因であると考察している。一方、VMA3, 4, 5 については、セメントへの吸着が少なく、橋架け構造ができないため、セメントペーストでの増粘は VMA1 に比べ小さいと考えられる。

以上のように、各種 VMA を添加した水溶液・セメントペーストで検討した結果、VMA1 はセメントへの吸着・橋架け構造及び分子構造の伸展により、セメントペーストにおいて、高い増粘作用を有することが確認できた。この結果から、次のステップとして、VMA1 に絞り、その添加の有無について、モルタルレベルでレオロジー特性の検討を行った。

(2) モルタルのレオロジー特性

一般に、コンクリートはビンガム流体として取り扱われることが多く、降伏値と流動性、塑性粘度と材料分離抵抗性は相関があるとされている。VMA1 を添加することによって、低セメント量な配合であっても降伏値の過度な上昇を抑制し、かつ、材料分離抵抗性に必要な塑性粘度を維持できることを目標とした。今回のモルタルのフレッシュ性状の結果を表-7 に、レオロジー定数の結果を図-7 に示す。

降伏値は、水セメント比の増加とともに増加する傾向であるが、VMA1 を添加した場合、その増加傾向は緩やかであった。一方、塑性粘度は、水セメント比の増加とともに減少するが、同一水セメント比では、VMA1 を添加した方が、塑性粘度は高い値を示した。また、実

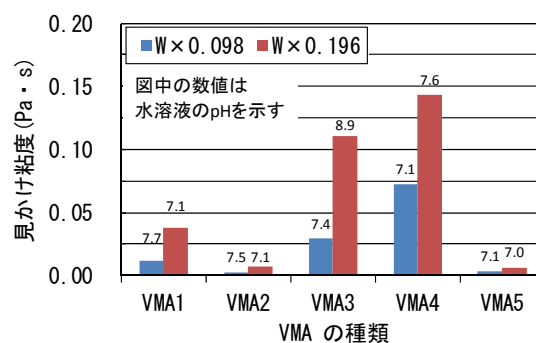


図-3 水溶液のレオロジー測定結果

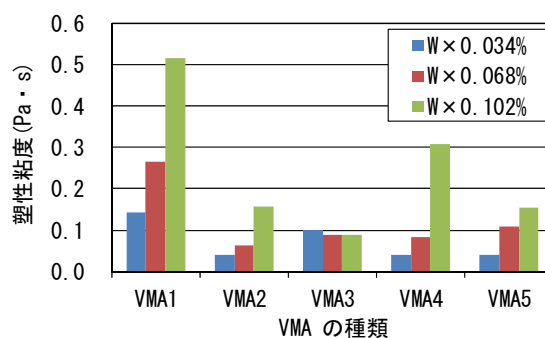


図-4 セメントペーストのレオロジー測定結果

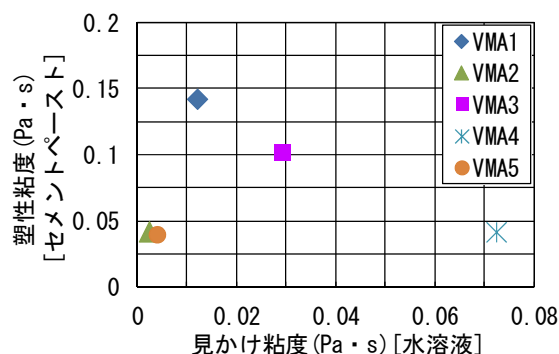


図-5 水溶液とセメントペースト粘度の関係

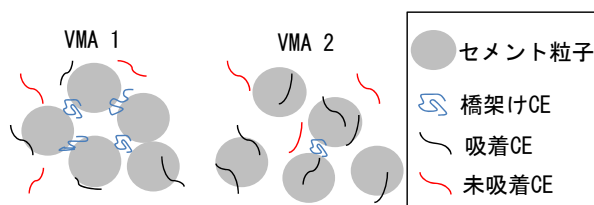


図-6 CE系VMAの橋架け構造のイメージ図

験を行った水セメント比の範囲では、増粘剤の添加・無添加に必要な SP の添加量に大きな差はなかった。従って、VMA1 は過度な SP の増量が必要ない増粘剤であるといえる。

文献 7)は、単位水量 175kg/m^3 、単位粗骨材量 380L/m^3 とし、水セメント比を変化させたコンクリート配合から、粗骨材を除いたモルタル配合で、増粘剤無添加の条件に

においてレオロジー定数の評価を行っている。各配合におけるモルタルフローは、SP の添加量により $200 \pm 10 \text{ mm}$ に調整しており、他の混和剤を使用していない点についても、本検討と同条件である。水セメント比を 30%、40%、50%へと増加させるとともに降伏値は上昇（10Pa から 20Pa）し、塑性粘度は低下（ $3.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ から $1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ）する傾向であり、これは、図-7 と同様の傾向であった。

文献 7) は、降伏値と塑性粘度がどのように変化するかを本検討と比較検討するために引用した。本検討における VMA1 が無添加の場合と、レオロジー定数の関係が同様の傾向であることが確認でき、VMA1 添加の効果が正しくレオロジー定数に反映していると考えられる。

一般的に、降伏値は流動性の指標とされており、本検討においても同一水セメント比の配合で SP の添加量を増減させ、流動性を変えた場合、流動性と降伏値は相関関係が認められた。しかし、表-7 に示すように、モルタルフロー値を一定としたにも関わらず、図-7 のように降伏値が異なる結果となった。その理由として、細骨材同士の粒子間距離が影響していると考えている。水セメント比の増加とともに細骨材の粒子間距離が小さくなり、細骨材同士の噛み込みが起り易くなるため、降伏値が増加する。しかし、VMA1 を使用することで、後述するモルタルの一体性が増加し、細骨材同士の噛み込みを低減できるため、高い水セメント比でも降伏値の過度な上昇を抑えていると考察している。

次に、塑性粘度と降伏値の関係を図-8 に示す。水セメント比 45%（VMA1 無添加）と水セメント比 55%（VMA1 添加）が同等の塑性粘度・降伏値を示している。この結果は、前述のように VMA1 がセメント粒子に吸着し橋架け構造及び伸展した分子構造をとることで、細骨材同士の粒子間距離を広げ、過度な降伏値の上昇を抑制し、かつ、材料分離抵抗性に必要な塑性粘度を維持できていると考

えている。以上から、VMA1 を添加することで、低セメント量の配合であっても、降伏値の増加は少なく、塑性粘度を高められる結果が得られた。このため、VMA1 を用いた高流動コンクリートは、流動性を阻害することなく、材料分離防止を担保できていると考えられる。

4.2 ブリーディングの評価（シリーズ 2）

ブリーディング試験の結果を図-9 に示す。VMA1 を添加した場合は、無添加の場合と比べて、ブリーディングを大幅に低減できた。なお、VMA1 を添加した水セメント比 55%のブリーディング量と VMA1 無添加の水セメント比 45%が同等の結果であり、これは、図-7 の塑性粘度と同様の傾向であった。材料分離抵抗性の指標として塑性粘度とブリーディング量が挙げられるが、今回の結果から低セメント量である水セメント比 55%の配合に

表-7 モルタルのフレッシュ性状の結果

W/C	VMA1	SP	AE	モルタルフロー	空気量
(%)	(g/m^3)	($\text{G} \times \%$)	($\text{G} \times \%$)	(mm)	%
35	0	1.00	0.0005	238	7.6
40		1.05	0.0008	244	7.5
45		1.10	0.001	250	5.2
50		1.20	0.0015	231	6.1
55		1.30	0.002	236	5.7
35	88	1.05	0.0002	237	8.0
40		1.10	0.0003	241	8.2
45		1.15	0.0005	238	6.6
50		1.25	0.0008	243	8.1
55		1.40	0.001	243	5.2

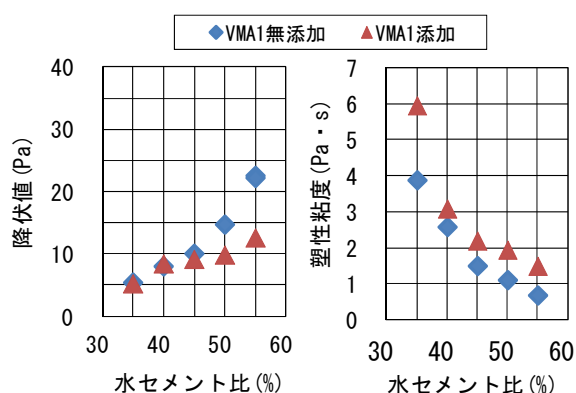


図-7 水セメント比と降伏値・塑性粘度の関係

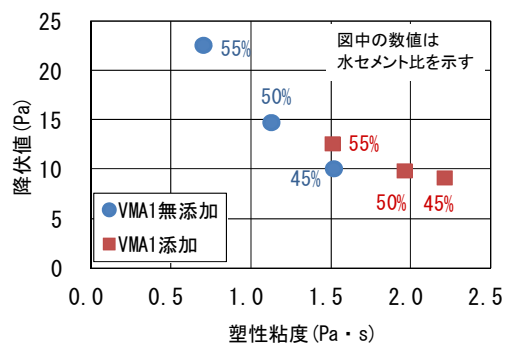


図-8 塑性粘度と降伏値の関係

VMA1 を使用することにより、水セメント比 45%（VMA1 無添加）の高流動コンクリートと同じ性状のコンクリートが得られることを示唆していると考察している。VMA1 がセメントへ吸着し橋架け構造及び伸展した分子構造をとることにより増粘するとともに、CE の親水性の官能基部分が水分子を補足し、ブリーディングを低減しているためと考えられている。

4.3 モルタルの一体性に関する評価（シリーズ 3）

引き抜き抵抗試験による粘着力の測定結果を図-10 に、振動ふるい試験によるセメントペーストの通過率の

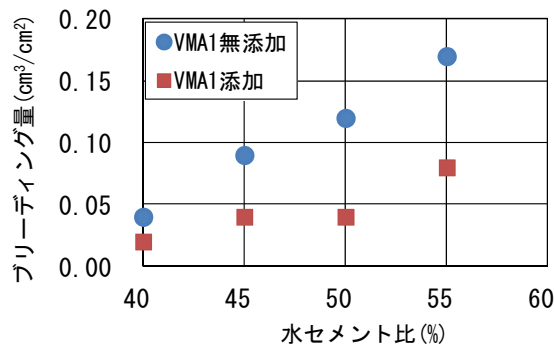


図-9 水セメント比とブリーディング量の関係

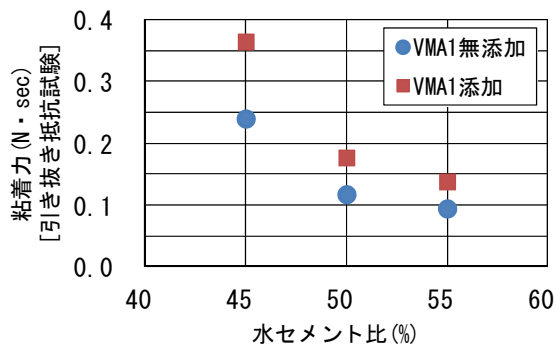


図-10 水セメント比と粘着力の関係

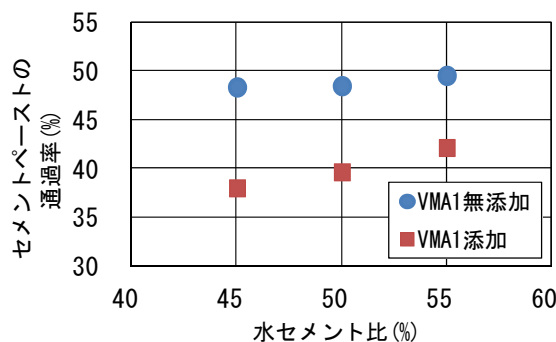


図-11 水セメント比とセメントペースト通過率の関係

測定結果を図-11に示す。粘着力は数値が高い方が、セメントペーストの通過率は数値が低い方が、モルタルの一体性は高いという指標となる。同一水セメント比でのVMA1の添加、無添加について、粘着力及びセメントペースト通過率を比較すると、明らかにVMA1を添加した方が優位となり、モルタルの一体性が高まっていると考えられた。

しかし、粘着力やセメントペーストの通過率の絶対値が実際の高流動コンクリートの材料分離抵抗性とどのような関係があるかについては、今後、検討が必要である。

5. まとめ

新規の特殊増粘剤であるVMA1を添加することによって、低セメント量の領域であっても、高い流動性と材料分離抵抗性を両立できる高流動コンクリートが製造で

きるメカニズムについて基礎的に検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) VMA1は、コンクリートに使用されている既存の増粘剤に比べ、水溶液中の粘度は低いが、セメントペースト中では効率よく増粘効果を発揮した。その要因の一つとして、セメントへの吸着・橋架け構造及び伸展した分子構造をとることが考えられる。
- (2) VMA1を添加することで、単位セメント量の低い領域（水セメント比 50～55%）でも降伏値の過度な上昇を抑えつつ、必要な塑性粘度を確保することができる。
- (3) 引き抜き抵抗試験やセメントペーストのふるい通過試験の結果から、VMA1を用いることでモルタル中のセメントペーストと骨材の一体性を高めることができていると考えられる。

参考文献

- 1) 桜井邦昭, 泉水大輔, 山川勉, 石田知子: 新規の特殊増粘剤を用いた低セメント量の高流動コンクリートの開発と実構造物への適用, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.40, No1, pp.1161-1166, 2018
- 2) 山川勉, 榎剛明, 菊池雅史: セルロースエーテルを添加したコンクリートの材料分離特性に関する材料設計法, 日本建築学会構造系論文集 第533号, pp.1-6, 2000.7
- 3) 坂田昇, 丸山久一, 南昌義: 増粘剤ウェランガムがフレッシュコンクリートの自己充填性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.538, V-31, pp.57-68, 1996.5
- 4) 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, 1993.9
- 5) 西林新蔵, 吉野公, 金松健一, 平田英樹: 高流動コンクリートの材料分離抵抗性に関する研究, 土木学会中国支部研究発表会発表概要集, Vol.47, pp.406-407, 1995
- 6) 小西秀和, 山川勉, 小山明男: セルロースエーテルのセメントへの吸着挙動に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), pp.85-86, 2013.8
- 7) 黄光律, 友澤史紀, 野口貴文: フライアッシュを細骨材の代替材として使用したモルタルのレオロジー・強度特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.211-216, 1997