

論文 混和材の種類が粉体系高流動モルタルの塑性粘度に与える影響に関する一考察

山中 啓資*1・横山 卓哉*2・橋本 親典*3・渡辺 健*4

要旨: 高流動コンクリートの普及には多くの障害がある。その1つに、混和材の種類によってフレッシュ性状が大きく異なり多くの試し練りを必要とする点がある。スランブフローは降伏値に依存するため、高性能減水剤の使用量によって、降伏値はある範囲内で制御可能であるが、塑性粘度の制御が難しい。本研究では、比表面積が大きく異なる4種類の混和材を用いて、高性能減水剤の使用量により高流動モルタルのゼロ打フローを一定にし、混和材の種類や単位量が塑性粘度に与える影響を、B型回転粘度計を用いて評価した。その結果、フローが一定であっても、塑性粘度が1.0~4.0 Pa・sの範囲で変化することが明らかになった。

キーワード: 高流動モルタル, 高性能減水剤, 混和材, フロー, 塑性粘度

1. はじめに

2017年7月から、国土交通省発注のコンクリート工事において、一般の土木用コンクリートのスランブの積算基準が、8cmから12cmに変わった。2017年3月に国土交通省の「コンクリート生産性向上検討協議会（会長：前川宏一横浜国立大学教授）」において設置された「流動性を高めたコンクリートの活用検討委員会（委員長：第3著者）」から「流動性を高めた現場打ちコンクリートの活用に関するガイドライン¹⁾」が制定され、荷卸し時のスランブの参考値として12cmが示され、従来のスランブの積算基準8cmが12cmに変わったためである。このガイドラインの4章は、「高流動コンクリートの選定と留意点」である。この4章の意味は、積算基準スランブ12cmが普及したあとは、高流動コンクリートの普及によってコンクリート工の生産性向上が実現するという意味が込められている²⁾。

つまり、コンクリート工の生産性向上の究極の姿は、現場での技能者が不要となる、締固め不要な高流動コンクリートを用いることである。よって、締固め不要な高流動コンクリートの普及を図る必要がある。

これまで、土木学会コンクリート委員会では、コンクリートライブラリー93号「高流動コンクリート施工指針」と136号「高流動コンクリートの配合設計・施工指針2012年版³⁾」を発刊し、高流動コンクリートの普及に寄与してきた。しかしながら、全国の生コンクリート工場で通常のスランブコンクリートの延長上としての高流動コンクリートの出荷が可能になっていないのが現状である。その障害に1つに、混和材の種類によってフレッシュ性状が大きく異なり多くの試し練りを必要とする点がある。

ある。締固め不要な高流動コンクリートのフレッシュ性状は、スランブフロー、漏斗流下時間および自己充填性で評価される。スランブフローは降伏値に依存し、高性能減水剤の使用量によって、ある目標スランブフローの範囲内に入るように制御することは難しくない。しかしながら、漏斗流下時間を制御することは難しい。漏斗流下時間は塑性粘度と降伏値に依存するため、定量的評価が難しい。通常のコンクリートでは降伏値と塑性粘度には相関性があるとされている⁴⁾。しかしながら、高流動コンクリートでは、その関係性を明らかにされていないのが現状である。

本研究では、粉体系高流動コンクリートの試し練りのための基礎的実験データを得ることを目的として、高性能減水剤の使用量によってゼロ打モルタルフローを一定に制御し、混和材の種類や単位量が、高流動モルタルの塑性粘度に及ぼす影響を、B型回転粘度計を用いて定量的に評価した。

混和材としては、フライアッシュII種（以後、FAII種）、フライアッシュIV種（以後、FAIV種）、強熱減量を1%以下にしたカーボンフリーフライアッシュ（以後、CfFA）および石灰石微粉末（以後、LSP）の4種類である。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1に、本実験に供した使用材料の物理的性質の一覧を示す。混和材は、FAII種、FAIV種、CfFA、LSPの4種類を用いた。FA系3種類は、すべてコンクリート用フライアッシュの品質規定（JIS A6201-2008）に合格するものである。なお、CfFAは、前述したJISの品質規格では、

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士前期課程 (学生会員)

*2 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士後期課程 (学生会員)

*3 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 社会基盤デザイン系 教授 工博 (正会員)

*4 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 社会基盤デザイン系 准教授 博(工) (正会員)

FA II種相当であるが、FAの未燃分を極限まで低減した高性能なFAである。LSPは、JCIのコンクリート用石灰石微粉末品質規格(案)に合格するものであるが、比表面積が4500cm²/g以上の微粉末である。4種類の混和材のうち、最も比表面積が大きい。高流動モルタルの空気量が塑性粘度に与える影響をできるだけ小さくするために、混和剤は高性能減水剤を用いた。

表-1 使用材料の物性値一覧

材料名	記号	種類および物性値
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3,470cm ² /g
混和材	FA II	フライアッシュ II種, 強熱減量 2.1%, 密度2.30g/cm ³ , 比表面積 3,860cm ² /g
	FaIV	フライアッシュIV種, 強熱減量 1.7%, 密度2.20g/cm ³ , 比表面積 1,980cm ² /g
	CfFA	フライアッシュ II種, 強熱減量 0.5%, 密度2.29g/cm ³ , 比表面積4,100cm ² /g
	LSP	石灰石微粉末, 産地:秩父 密度2.72g/cm ³ , 比表面積4,960cm ² /g
細骨材	S	砂岩系砕砂, 産地:徳島県, 吸水率1.77% 表乾密度2.57g/cm ³ , 粗粒率2.20
混和剤	SP	高性能減水剤, ポリカルボン酸エーテル系化合物, 密度1.08±0.05g/cm ³ (20°C)

表-2 に本実験に供した高流動モルタルの配合の一覧を示す。1シリーズ9配合とし4シリーズで合計36配合の高流動モルタルを実験の対象とした。

本実験では、粉体系高流動コンクリートの自己充填性のランクを障害R2で充填高さ300mm以上のランク2とし、単位粗骨材絶対容積の標準範囲を0.30~0.33m³/m³とし⁵⁾、高流動コンクリート1m³からこの単位粗骨材絶対容積の差し引いた容積を高流動モルタルとして、モルタル1m³に対して単位混和材容積を60ℓ~140ℓの範囲で、9水準に変化させた。なお、モルタルの空気量は、結果に影響しないため0%と設定した。

全36配合で、水セメント比(W/C)を50%で一定とした。各シリーズにおいて、細骨材容積比(s/m)を42%, 45%および48%の3水準を設定し、水粉体比(W/P)を30%前後から40%前後変化させるため、混和材の単位量を3水準とし、計9水準とした。なお、混和材の密度が異なるため、W/Pは4シリーズで若干異なる結果になった。

高性能減水剤(SP剤)の使用量は、目標ゼロ打モルタル

表-2 高流動モルタルの配合一覧

シリーズ名	配合名	W/C (%)	s/m (%)	W/P (%)	単位量(kg/m ³)										
					W	C	FA II	FAIV	CfFA	LSP	S	SP			
FA II種 シリーズ	II-1	50	42	30	268	536	352					1060	11.1		
	II-2		42	32	276	552	299					1079	10.2		
	II-3		42	34	282	564	273					1083	10.0		
	II-4		45	34	268	536	250					1155	9.8		
	II-5		45	35	276	552	234					1195	9.4		
	II-6		45	37	282	564	202					1152	9.2		
	II-7		48	37	268	536	182					1234	9.2		
	II-8		48	39	276	552	160					1233	8.7		
	II-9		48	40	282	564	135					1231	8.6		
FAIV種 シリーズ	IV-1	50	42	32	285	570		324				1140	10.7		
	IV-2		42	33	285	570		292				1117	9.9		
	IV-3		42	34	283	565		260				1080	9.3		
	IV-4		45	35	285	570		256				1220	10.1		
	IV-5		45	36	285	570		226				1192	9.4		
	IV-6		45	37	283	565		196				1154	8.8		
	IV-7		48	38	285	570		184				1303	9.8		
	IV-8		48	39	285	570		158				1271	9.1		
	IV-9		48	41	285	570		130				1243	8.6		
CfFA シリーズ	Cf-1	50	42	31	270	540						1080	10.7		
	Cf-2		42	33	276	552							297	1078	9.8
	Cf-3		42	34	283	566							270	1080	9.2
	Cf-4		45	34	270	540							250	1160	9.9
	Cf-5		45	35	276	552							229	1155	9.0
	Cf-6		45	37	283	566							203	1155	9.0
	Cf-7		48	38	270	540							180	1235	9.7
	Cf-8		48	39	276	553							159	1232	8.9
	Cf-9		48	40	283	565							135	1233	8.6
LSP シリーズ	LP-1	50	42	29	270	540						398	1080	11.3	
	LP-2		42	31	276	552							350	1081	10.4
	LP-3		42	32	283	566							320	1081	10.0
	LP-4		45	32	270	540							297	1156	9.8
	LP-5		45	34	276	552							269	1157	9.4
	LP-6		45	35	283	565							242	1155	9.1
	LP-7		48	36	270	540							216	1234	9.3
	LP-8		48	37	276	552							188	1234	9.1
	LP-9		48	39	259	518							144	1347	8.3

ルフローを 270±15mm の範囲に入るように各配合で決定した。したがって、1 配合に関して、1 回以上の試験練りを行い、SP 剤の使用量を決定した。なお、LSP のシリーズは、FA 系 3 種類の混和材と比較して比表面積が大きいため、ゼロ打モルタルフローが大きくなり、目標の範囲内ではあるが、若干目標フローの中央値から値が離れた配合もある。

目標ゼロ打モルタルフローは、事前に、JIS A 1150 のスランプフロー試験でスランプフローが 650±50mm、JSCE F511 の充填試験で充填高さ R2 が 300mm 以上を満足する高流動コンクリートの試験練りを行い、目標を満足した高流動コンクリートを 5mm ふるいでウェットスクリーニングした高流動モルタルを用いて、ゼロ打モルタルフロー試験を行い、このフローを適正フローとして選定した。

2.2 モルタルの練混ぜ方法

モルタルは、強制 1 軸練りモルタルミキサ(容量：20ℓ)を用いて練混ぜ量 5ℓ として練り混ぜた。図-1 に各種の材料の投入順序ならびに練混ぜ時間を示す。静置時間を設けたのは、高性能減水剤の効果を引き出すためである。

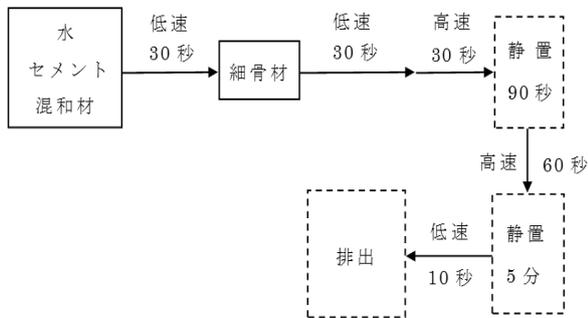


図-1 高流動モルタルの練混ぜ手順

2.3 B 型回転粘度計の計測と塑性粘度の算出方法

高流動モルタルの塑性粘度は、B 型粘度計を用いて、各せん断速度(rpm)における絶対粘度(mPa・s)を測定した。絶対粘度は、動粘度と区別され、物質の一般的な粘りの度合を示すものである。さらに、せん断応力(N/m²)を式(1)によって算出した。

$$\tau = \frac{1}{60000} \cdot \mu \cdot n \quad (1)$$

ここに、 τ ：せん断応力(N/m²=Pa)

μ ：絶対粘度(mPa・s=10⁻³Pa・s)

n ：せん断速度(rpm=1/60s)

B 型回転粘度計の測定手順を以下に示す。まず、測定するモルタルをサンプラーカップに 1ℓ 入れる。次に、使用するロータを取り付け、浸液マークの箇所までモルタルが浸漬するように、スタンドの昇降ハンドルを回して、粘度計本体を上下に位置調整する。その際、ロータは、

サンプラーカップの中央に位置するよう調整する。電源を入れた後、ウォーミングアップ時間として 10 分以上放置する。粘度計本体に取り付けたロータのロータコードを設定およびロータの回転速度の設定を行う。回転速度は、2rpm、4rpm、10rpm、20rpm とし、測定時間はそれぞれ 30 秒、15 秒、10 秒、10 秒とした。回転粘度計での測定の状況を図-2 に示す。



図-2 B 型回転粘度計の概観および計測状況

粘度試験結果から、せん断ひずみ速度(1/s)とせん断応力(N/m²)の関係を示した直線の傾きを求めることにより、塑性粘度(Pa・s)を決定した。図-3 に 36 配合の各シリーズうち、最も単位混和材量が多い試験番号 1 の試験結果を合わせて示す。絶対粘度の実験値から、式(1)を使って、せん断応力を求め、直線近似式の傾きから塑性粘度を決定した。

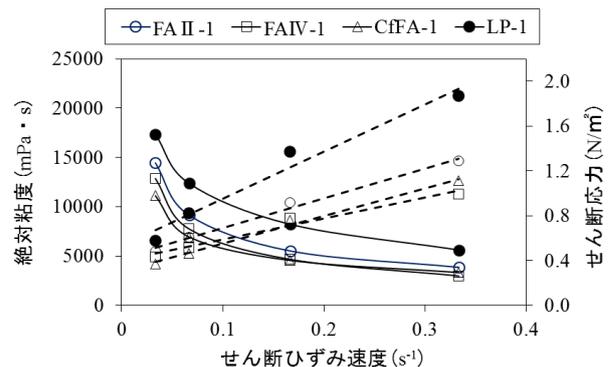


図-3 B 型粘度計で得られた絶対粘度、せん断応力、せん断ひずみ速度の関係の計測結果の一例

3. 実験結果および考察

3.1 SP 剤使用量について

図-4 に、単位混和材量と単位 SP 剤使用量の関係を示す。図-5 に、単位混和材容積と単位 SP 剤使用量の関係を示す。混和材の種類に関係なく、単位混和材量が増加するに従い、単位 SP 剤使用量が増加した。高流動コンクリートの材料分離抵抗を確保するためには、単位混和材量を増やす必要があるが、材料分離抵抗性と流動性の相反する性状を確保するためには、SP 剤使用量は相当に増えることを意味する。しかし、単位混和材量を 2 倍に増やしても、SP 剤使用量が 2 倍必要ということはない。

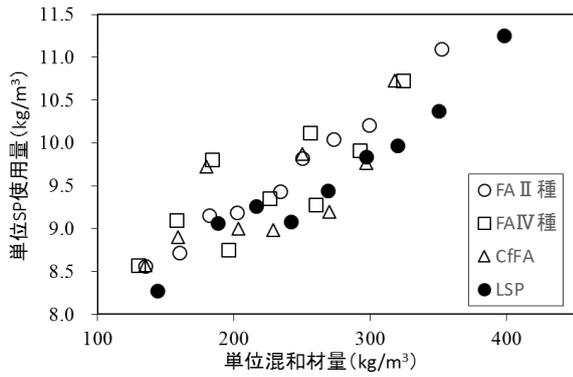


図-4 単位混和材量と単位 SP 剤使用量の関係

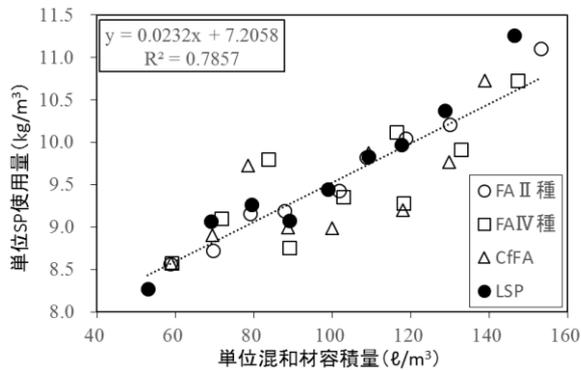


図-5 単位混和材容積と単位 SP 剤使用量の関係

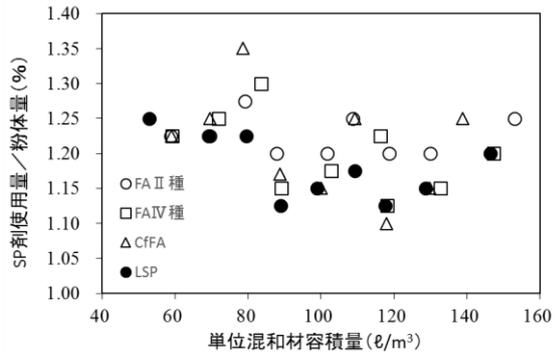


図-6 単位混和材容積と単位 SP 剤使用量比の関係

混和材容積量で4種類の混和材のSP剤使用量を比較すると、ほぼ同一直線状に分布しているが、同一フローに対するSP剤使用量は単位混和材料の質量と比較して容積の方がより直線性が高いと思われる。

図-6に、単位混和材容積と単位混和材量に対するSP剤使用量の比率(%)の関係を示す。混和材容積量に関係なくSP剤使用量比率はほぼ一定である。しかし、混和材容積量が増加するに従って、SP剤使用量比率は一定のばらつきを有しながら減少する傾向が認められる。

3.2 ゼロ打モルタルフローと塑性粘度の結果

表-3に、36配合のゼロ打モルタルフローと塑性粘度の結果の一覧を示す。表-4に、シリーズ別のゼロ打モルタルフローの平均値と標準偏差を全データと合わせて示す。平均値および標準偏差の値は、シリーズ毎に9回の試験結果から算出した。目標ゼロ打モルタルフローが

表-3 高流動モルタルのゼロ打モルタルフローと塑性粘度の一覧

シリーズ名	配合名	ゼロ打モルタルフロー(mm)	塑性粘度 (Pa·s)
FA II種シリーズ	II-1	270×265	2.73
	II-2	271×266	2.39
	II-3	267×267	2.48
	II-4	264×263	2.28
	II-5	273×271	1.75
	II-6	274×265	2.07
	II-7	267×266	1.72
	II-8	263×263	1.89
	II-9	258×251	1.63
FAIV種シリーズ	IV-1	269×267	2.41
	IV-2	272×268	1.96
	IV-3	273×270	1.69
	IV-4	257×256	2.15
	IV-5	268×268	1.84
	IV-6	258×257	1.66
	IV-7	269×266	1.63
	IV-8	273×270	1.48
	IV-9	258×258	1.34
CfFAシリーズ	Cf-1	275×275	3.19
	Cf-2	275×274	3.09
	Cf-3	272×271	2.36
	Cf-4	272×267	2.61
	Cf-5	262×259	1.99
	Cf-6	268×263	2.19
	Cf-7	261×261	2.64
	Cf-8	266×265	1.94
	Cf-9	272×260	1.73
LSPシリーズ	LP-1	276×275	3.17
	LP-2	277×276	3.37
	LP-3	279×276	3.76
	LP-4	271×270	3.48
	LP-5	264×263	3.65
	LP-6	276×275	3.32
	LP-7	270×265	3.27
	LP-8	281×279	2.58
	LP-9	265×261	2.43

表-4 シリーズ別のゼロ打モルタルフローの変動

シリーズ	平均値(mm)	標準偏差
FA II種	265.7	4.74
FAIV種	265.4	5.87
CfFA	267.7	5.02
LSP	272.2	5.91
36配合	267.7	6.05

270±15mmであるため、すべて、目標の範囲内に収まっている。降伏値は、ほぼ同程度の高流動モルタルを製造できた判断できた。なお、LSPシリーズは、平均値が272.2mmであり、FA系3シリーズより平均値が5mm前後大きくなった。

図-7に、ゼロ打モルタルフローと塑性粘度の関係を示す。注目すべきことは、同一降伏値に対して、塑性粘度が1.0~4.0Pa·sまで大きく変化することが明らかになった。普通コンクリートでは、降伏値と塑性粘度には相関性があるが、高流動コンクリートでは、同一降伏値であっても塑性粘度が大きく異なり、この傾向が、配合選定が難しい原因の1つであると考えられる。

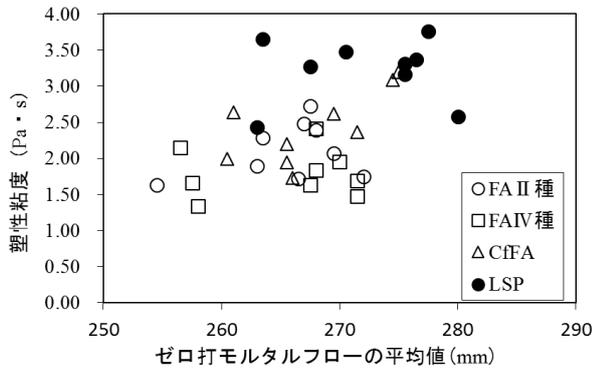


図-7 ゼロ打モルタルフローと塑性粘度の関係

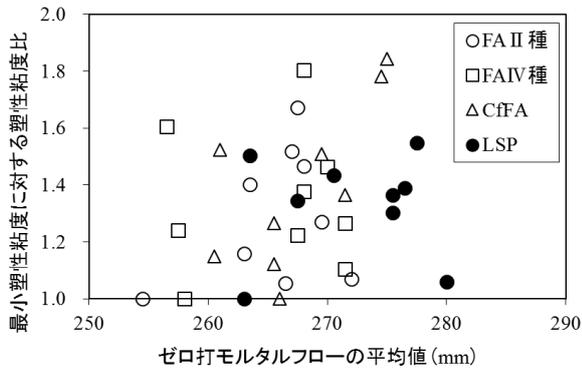


図-8 ゼロ打モルタルフローと塑性粘度比率の関係

シリーズ別では、FAIV種の塑性粘度が最も小さく、FA II種とCfFAは同程度で、LSPが一番大きい。これは、比表面積に比例しており、比表面積が小さい混和材の方が、塑性粘度が小さくなる傾向があると言える。

各シリーズで、最も塑性粘度が小さい配合は、単位混和材量が最も少ない配合番号9である。シリーズ別に、最小の塑性粘度を基準として各配合の塑性粘度の比率を塑性粘度比として、図-8に、ゼロ打モルタルフローと塑性粘度比の関係を示す。

塑性粘度比では、比表面積の大きいLSPが小さくなり、逆に比表面積の小さいFAIV種やCfFAが大きい結果になった。比表面積が大きい混和材の方が、塑性粘度の変化が小さいことを意味する。

なお、本実験の範囲では、塑性粘度比の平均は、1.4前後であると言える。

3.3 ゼロ打モルタルフローと SP 剤使用量の関係

ゼロ打モルタルフローと SP 剤使用量の関係として、図-9にゼロ打モルタルフロー平均値と SP 剤使用量の関係を、図-10にゼロ打モルタルフロー平均値と SP 剤使用量比率の関係を示す。

ゼロ打モルタルフローと SP 剤使用量には正の相関性が認められる。一方、SP 剤使用量比率では、逆相関である。本実験では、ゼロ打モルタルフローを一定にするように使用量を変化させたため、この傾向の違いは無視で

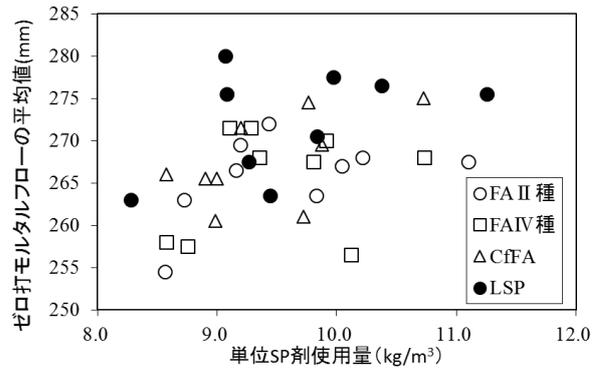


図-9 ゼロ打モルタルフローと単位 SP 剤使用量の関係

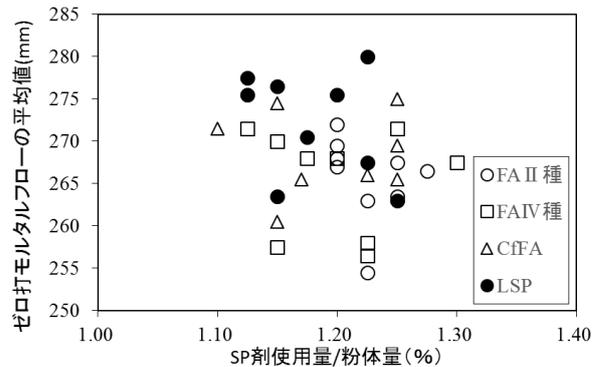


図-10 ゼロ打モルタルフローと単位 SP 剤使用量比の関係

きる範囲と判断した。

シリーズ別では、FA II種の SP 剤使用量比率は 1.25%前後でほぼ一定である。他の 3 種の混和材の SP 剤使用量比率は、1.10~1.30%の範囲でばらつきが大きかった。

3.4 塑性粘度と SP 剤使用量の関係

図-11に塑性粘度と SP 剤使用量の関係を、図-12に塑性粘度と SP 剤使用量比率の関係を示す。塑性粘度と SP 剤使用量には正の相関性が認められる。一方、SP 剤使用量比率では、逆相関である。特にLSPシリーズが顕著である。FA系3種では、逆相関があるとまでは言えない。

前掲した図-8と同様に、各シリーズで、最も塑性粘度が小さい配合番号9の塑性粘度を基準として各配合の

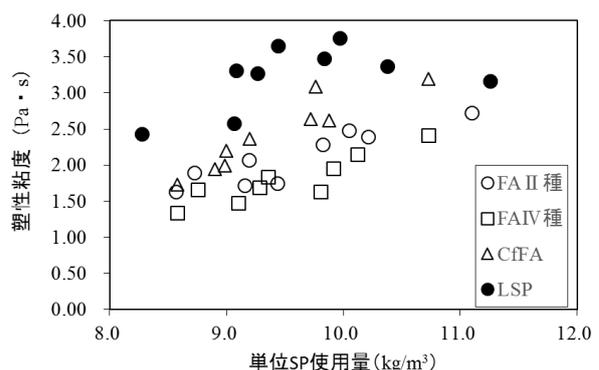


図-11 塑性粘度と SP 剤使用量の関係

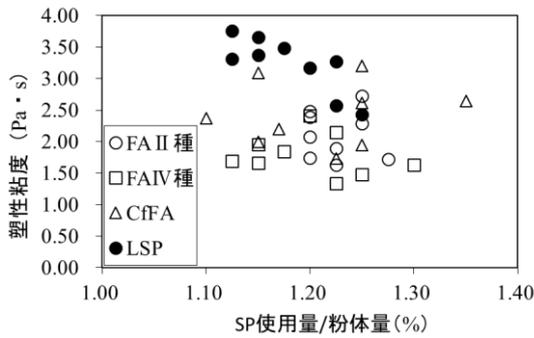


図-12 塑性粘度と単位 SP 剤使用量比の関係

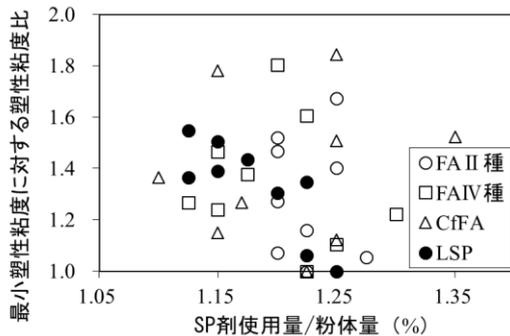


図-13 単位 SP 剤使用量比と塑性粘度比の関係

塑性粘度の比を塑性粘度比として、図-13 に、SP 剤使用量比と塑性粘度比の関係を示す。

塑性粘度とは異なり、塑性粘度比では、LSP が小さくなり、FAIV種や CfFA が大きくなった。また、LSP は、単位 SP 剤使用量比が大きくなるに従って、塑性粘度比が大きくなった。他の FA 系 3 種類の混和材とは逆の傾向が認められた。

4. 粉体系高流動コンクリートの試験練りに対する手法の提案

本実験で得られた成果を基に、粉体系高流動コンクリートの試験練りに対する手法を提案する。

高流動コンクリートの試験練りを行う前に、高流動モルタルの試験練りを行い、所要の降伏値と塑性粘度を有するように、単位混和材量と SP 剤使用量を決定する。そのあとに、高流動コンクリートの試験練りを行う。

まず、粉体系高流動コンクリートの自己充填性のランクを選択し、単位粗骨材絶対容積を決定する。ランク 1 は、 $0.29\text{m}^3/\text{m}^3$ 、ランク 2 は、 $0.315\text{m}^3/\text{m}^3$ 、ランク 3 は、 $0.34\text{m}^3/\text{m}^3$ とする。高流動モルタルのゼロ打モルタルフローを $270\pm 15\text{mm}$ 、塑性粘度比率を 1.4 ± 0.5 とする(参考値)。

設計基準強度から配合強度を求め、W/C を決定する。単位水量 W は $175\text{kg}/\text{m}^3$ とする。W/C と単位水量 W から、単位セメント量 C が確定する。

次に、混和材の種類 (FA II 種, FAIV種, CfFA および LSP) を経済かつ供給の可否等を考慮して選択する。

単位混和材容積を $50\sim 150\text{l}/\text{m}^3$ から選択する。

単位混和材容積から総粉体量を求め、図-10 から、ゼロ打モルタルフロー 270mm に対する単位 SP 剤使用量を求める。一方、図-13 から、単位 SP 剤使用量比に対する塑性粘度比を求める。その値が、1.4 以上になる場合は、単位混和材容積を変更し、塑性粘度比を 1.4 程度になるまで繰り返す。

高流動モルタルの配合から、単位粉体量と SP 剤使用量を高流動コンクリート 1m^3 に換算し、高流動コンクリートの配合を決定する

5. 結論

粉体系高流動コンクリートの試験練りのための基礎的実験データを得ることを目的として、混和材の種類や単位量が、高流動モルタルの塑性粘度に及ぼす影響を、B 型粘度計を用いて定量的評価した。

着目した混和材は、FA II 種, FAIV種, CfFA および LSP の 4 種類である。降伏値を SP 剤使用量によってほぼ一定として、単位混和材量を 9 水準に変化させた計 36 配合の高流動モルタルの実験の結果、本研究の範囲内で明らかになったことを以下に記す。

- 1) 塑性粘度は、 $1.0\sim 4.0\text{Pa}\cdot\text{s}$ の範囲で変化する。
- 2) 単位混和材容積と SP 剤使用量は比例するが、混和材の種類に関係なく 1 つの回帰直線が存在する。
- 3) ゼロ打モルタルフロー 270mm に対する SP 剤使用量/粉体量はほぼ一定である。
- 4) 最小塑性粘度に対する塑性粘度比は、混和材の種類に依存し、大きく変化する。

参考文献

- 1) 国土交通省：流動性を高めた現場打ちコンクリートの活用に関するガイドライン，2017.3
- 2) 前川 宏一，橋本 親典，坂田 昇：土木学会関連指針の観点からの「流動性を高めた現場打ちコンクリートの活用に関するガイドライン(国土交通省)」について，コンクリート工学，Vol.56, No.3, pp.213-217, 2018.3
- 3) 土木学会コンクリート委員会編：高流動コンクリートの配合設計・施工指針(2012 年版)，コンクリートライブラリー136 号，土木学会，2012.6
- 4) 岡田 清編：フレッシュコンクリートのレオロジー，最新コンクリート工学 (株)国民科学社，pp.2~17，1981
- 5) 土木学会コンクリート委員会編：[特殊コンクリート] 3 章 高流動コンクリート，2017 年制定コンクリート標準示方書【施工編】，pp.231~243，土木学会，2018.3