

論文 高流動モルタルの流動性の評価に関する研究

宮本 欣明*¹・山本 康弘*²

要旨：高流動モルタルの調合要因である高性能A E減水剤添加量，分離低減剤添加量および水セメント比がその流動特性に及ぼす影響について，回転粘度計試験および新たに導管粘度計として開発したJ型フロー試験によるレオロジー定数により検討を行った。その結果，分離低減剤量を増すと塑性粘度および降伏値は増加し，高性能A E減水剤量を増すと降伏値は低下し，塑性粘度はあまり影響を受けないことが確認された。また，本実験の範囲内で，J型フロー試験は回転粘度計試験よりも塑性粘度の値を感度良く測定できた。

キーワード：レオロジー定数，塑性粘度，降伏値，高性能A E減水剤，分離低減剤

1. はじめに

高流動コンクリートの流動特性は，各種調合要因のなかでも特に高性能A E減水剤および分離低減剤の添加量によって大きく影響を受け，それら混和剤が流動特性に及ぼす効果について，多くの研究が進められている(例えば1)。

本報告は，高流動コンクリートを構成しているモルタルについて，その調合要因である高性能A E減水剤添加量，分離低減剤添加量および水セメント比がモルタルの流動特性に及ぼす影響について検討した。モルタルの流動特性は，一般的には回転粘度計試験結果より算出する塑性粘度および降伏値で評価されている。しかし，回転粘度計試験は，円筒の強制回転に伴い円筒壁面でモルタルのすべりが生じるなどの問題が指摘されており，精度の良い結果を得るために多くの試みが行われている(例えば2)。今回の研究では，モルタルの流動性評価を従来の回転粘度計試験および新たに導管粘度計として開発したJ型フロー試験結果より算出するレオロジー定数にて行うと共に，両試験方法の比較を行った。

の調合を表-2に示す。水セメント比は，35%，40%および45%の3水準とし，セメントの質量に対する細骨材の割合を示す細骨材セメント比(S/C)をそれぞれ1.4，1.5および1.6とした。水セメント比が40%の調合では，高性能A E減水剤の添加量を単位セメント量の1.5%，2.0%および2.5%の3水準に設定し，それぞれの高性能A E減水剤添加量について，分離低減剤の添加量を単位水量の0~0.4%の間で5水準変化させた。水セメント比が35%および45%の調合では，高性能A E減水剤添加量を2.0%と一定とし，分離低減剤の添加量を3水準に設定した。

2.2 練混ぜ

モルタルの練混ぜは，JIS R 5201に定めるミキサを使用し，練混ぜ量は1.5リットルとした。練混ぜ方法は，分割練り工法により以下に示す手順で行った。

(細骨材+1次水+高性能A E減水剤+分離低減剤)60秒→(セメント)120秒→(2次水)120秒

表-1 使用材料

セメント (C)	普通ポルトランドセメント
細骨材 (S)	珪砂5号 粗粒率：2.59
高性能A E減水剤(SP)	ポリカルボン酸系
分離低減剤 (Vi)	セルロースエーテル系

2. 実験概要

2.1 使用材料とモルタルの調合

本実験で使用した材料を表-1に，モルタル

*1 四国職業能力開発大学校助教授 住居環境科 (正会員)

*2 東京工芸大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

表-2 モルタルの調合および試験結果

W/C (%)	S/C	単位量 (kg/m ³)			高性能 AE減水剤量 (C×%)	分離低減剤量 (W×%)	練混ぜ終了直後		120分経過時点				
		セメント	水	細骨材			回転粘度計		回転粘度計		J型フロー試験		スランプフロー (cm)
							塑性粘度 (Pa・s)	降伏値 (Pa)	塑性粘度 (Pa・s)	降伏値 (Pa)	塑性粘度 (Pa・s)	降伏値 (Pa)	
40	1.5	734	294	1100	1.5	0	2.6	3.0	4.0	5.0	7.9	13.1	29.5
						0.05	4.9	9.6	8.1	26.8	9.8	33.1	27.3
						0.1	6.6	14.7	8.8	25.5	14.4	28.7	28.0
						0.2	12.6	30.4	13.6	46.5	34.4	83.8	21.5
						0.4	16.8	80.8	21.8	100.1	74.8	106.7	21.1
	1.5	731	292	1096	2.0	0	2.8	1.8	4.4	6.8	8.0	16.1	32.8
						0.05	4.0	5.2	5.7	12.1	10.3	23.2	30.5
						0.1	6.2	12.5	9.8	24.7	18.1	43.6	27.1
						0.2	10.6	22.9	13.9	40.6	32.8	59.1	23.8
						0.4	16.5	55.2	21.2	90.8	70.3	84.2	21.6
	1.5	728	291	1093	2.5	0	2.8	0.4	3.5	2.6	7.5	7.9	34.6
						0.05	3.9	0.6	5.6	6.1	10.6	17.6	33.2
						0.1	4.1	2.8	7.9	10.8	15.7	19.7	31.6
						0.2	9.4	10.0	13.9	34.6	30.9	40.7	26.9
						0.4	16.1	39.7	20.6	79.8	73.9	66.4	23.3
35	1.4	784	274	1097	2.0	0.1	8.8	17.4	11.8	31.5	30.1	61.4	23.1
						0.2	17.7	24.6	24.3	90.3	54.0	101.3	19.8
						0.4	24.6	77.6	29.8	144.4	139.9	120.6	18.7
45	1.6	685	308	1096	2.0	0.1	3.7	5.1	4.9	9.5	9.5	13.4	32.3
						0.2	7.7	14.6	9.8	24.8	18.3	35.6	29.0
						0.4	10.5	27.7	11.6	41.5	32.6	50.5	27.1

2.3 流動性試験

流動性試験項目は、回転粘度計試験および J 型フロー試験とした。また、参考値として、縮尺が JIS A 1101 に規定する 1/2 のスランプコーンを用いスランプフロー値を測定した。

(1) 回転粘度計試験

図-1 に示す外円筒回転型の回転粘度計を使用し、練混ぜ終了時、20 分、40 分、60 分、90 分および 120 分経過時点で測定を行った。回転粘度計による試験結果の一例を図-3 に示す。レオロジー定数は、高流動モルタルとして流下充填に適切と考えられるせん断速度の値である 10(1/s)以下の範囲を対象とした。

(2) J 型フロー試験

J 型フロー試験器は、図-2 に示したとおりであり、試験は流出口に蓋をし、モルタルを充填した後蓋を取り、圧力差によりモルタルヘッドが 5cm 下がるごとに要した時間を測定し、モルタルの圧力差と流出速度の関係を 5cm 区間ごとに算出した。そして、実験結果をもとに既往の研究¹⁾で示された理論式(2)および(3)より、

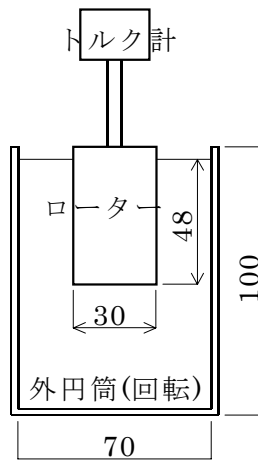


図-1 回転粘度計

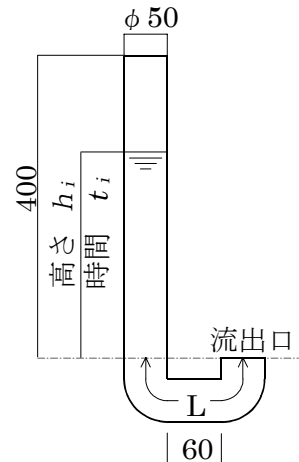


図-2 J型フロー試験器

区間 i ごとにせん断応力 P_i およびせん断速 V_i を求めた。J 型フロー試験により求めたせん断応力 P とせん断速度 V の実験結果の一例を図-4 に示す。流動開始直後のモルタルは十分な流下速度に達していないため、図面上、せん断応力が減少してもせん断速度は大きくなる結果を示しており、せん断応力が約 150Pa 以下で栓流状態の安定した流動になると考えられる。次に、フレッシュ時のモルタルをビンガム流体とみな

した場合には、せん断応力 P とせん断速度 V との間に(1)式が成立することにより図中の回帰直線の傾きの逆数を塑性粘度 λ とした。また、横軸切片は降伏値 τ を示している。

$$P = \lambda \cdot V + \tau \quad (1)$$

$$P = \frac{\Delta PR}{2l} = \frac{\rho (h_{i-1} + h_i) / 2 \cdot R}{L + (h_{i-1} + h_i) / 2} \cdot \frac{R}{2} \quad (2)$$

$$V = 4Q / \pi R^3 = 4(h_{i-1} - h_i) / (t_i \cdot R) \quad (3)$$

P : せん断応力(Pa), ΔP : 圧力差(Pa)
 R : 導管半径(cm), λ : 塑性粘度(Pa・s)
 V : せん断速度(1/sec), Q : 流量(cm³/sec)
 τ : 降伏値(Pa), l : 導管の長さ(cm)
 ρ : モルタル密度(g/cm³)
 h_i : 区間 i のモルタルの高さ(cm)
 t_i : 区間 i のモルタルの流下時間(sec)

J型フロー試験は、練混ぜ開始後 120 分経過時点で行った。

3. 実験結果

各調合に対する練混ぜ終了直後および 120 分経過時点での流動性試験結果を表-2 に示す。それぞれの調合要因ごとに流動特性に及ぼす影響に関して検討した。

3.1 分離低減剤の影響

図-5 は、分離低減剤添加量の変化が塑性粘度および降伏値に及ぼす影響の一例を、水セメント比が 40% の練混ぜ終了直後のモルタルについて回転粘度計で測定した結果を示したものである。このように、塑性粘度は分離低減剤量を増加すると大きくなり、分離低減剤量 0.1% の増加に対し約 4Pa・s の増加となった。また、高性能 AE 減水剤添加量の影響は見られなかった。一方、降伏値は分離低減剤の添加量を増加すると、下に凸の 2 次曲線的に増加した。また、高性能 AE 減水剤の添加量が多いほど降伏値は小さい値を示した。

図-6 および図-7 は、練混ぜ開始後 120 分経過した水セメント比 40% のモルタルについて、回転粘度計試験および J 型フロー試験の結果を示したものである。J 型フロー試験結果より算

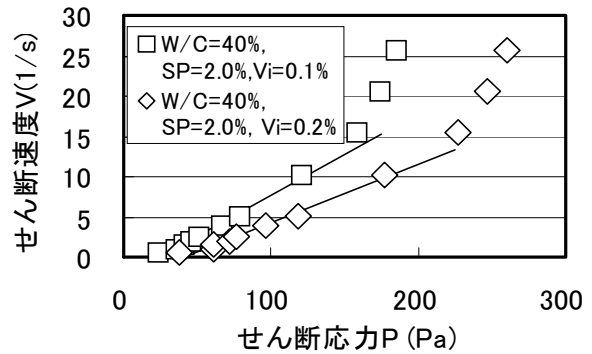


図-3 回転粘度計試験の結果 (一例)

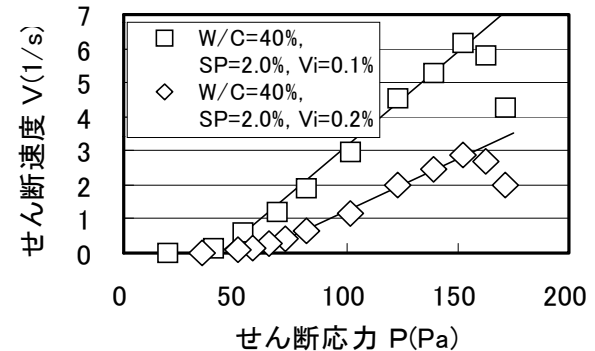


図-4 J型フロー試験の結果 (一例)

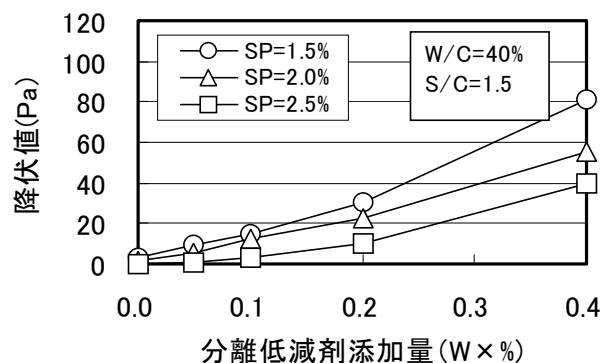
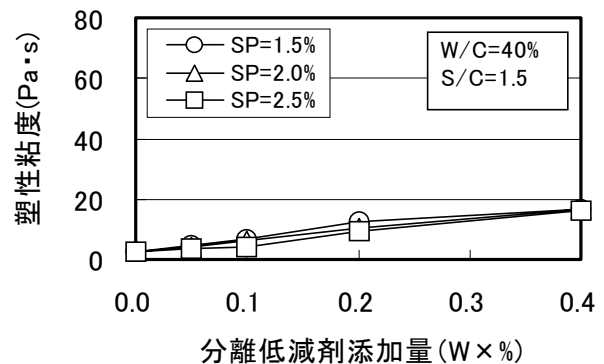


図-5 分離低減剤量とレオロジー一定数 (回転粘度計試験, 練混ぜ直後)

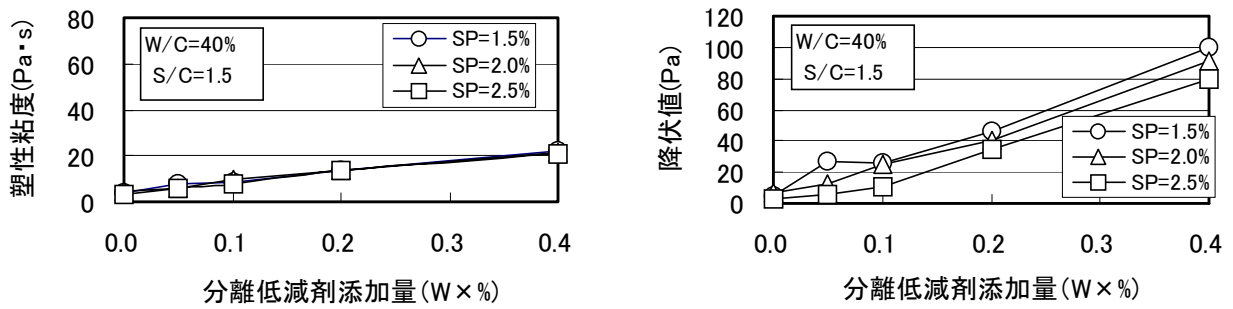


図-6 分離低減剤添加量とレオロジー一定数 (回転粘度計試験, 120分経過時点)

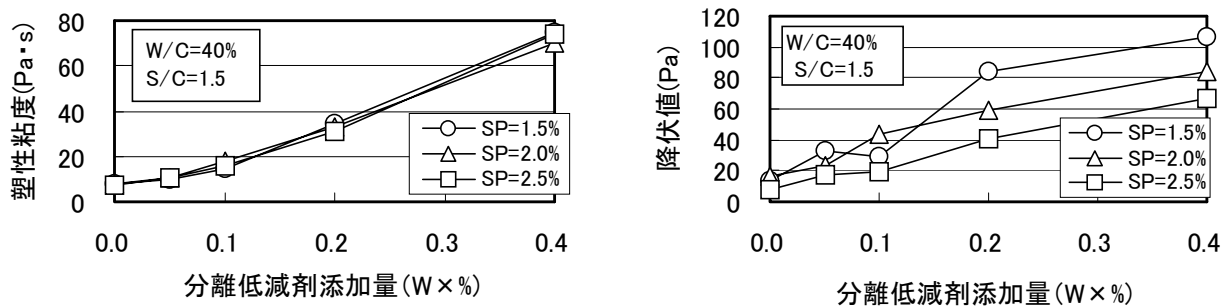
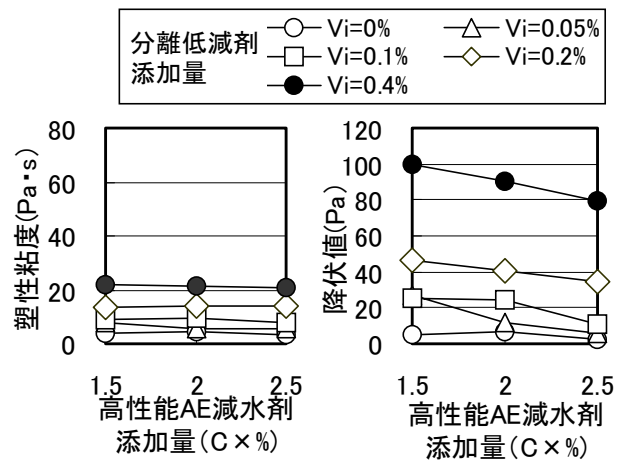


図-7 分離低減剤添加量とレオロジー一定数 (J型フロー試験, 120分経過時点)

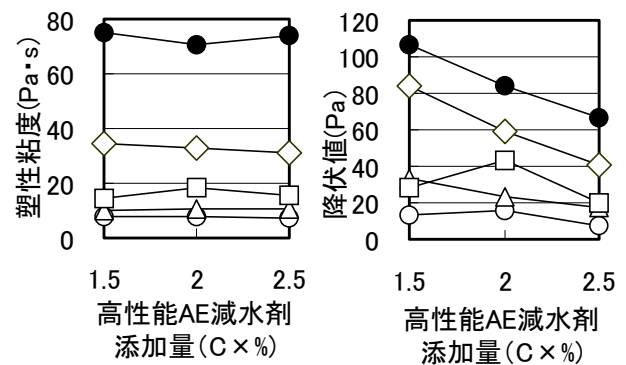
出した塑性粘度は回転粘度計の試験結果に比べ大きい値を示し、分離低減剤の添加による塑性粘度の増加が顕著になっている。一方、降伏値は両試験結果ともに、分離低減剤量を増すに従い増加し、ほぼ同じ値を示している。以上より、分離低減剤の添加量を増すと塑性粘度は増加し、降伏値も増加することが分かった。

3.2 高性能 AE 減水剤の影響

図-8(a)および図-8(b)は、練混ぜ開始後120分経過した水セメント比40%のモルタルについて、高性能AE減水剤量の変化がモルタルの塑性粘度および降伏値に及ぼす効果を、試験法別に示したものである。このように、回転粘度計試験による塑性粘度の値はJ型フロー試験結果に比べ小さいが、両試験結果は同じ傾向を示した。すなわち、塑性粘度は高性能AE減水剤の添加量にかかわらずほぼ一定の値をとり、降伏値は高性能AE減水剤の添加量を増加すると減少し、その減少の割合は分離低減剤量が多いほど大きくなる。以上より、高性能AE減水剤は降伏値を低下させる効果があり塑性粘度に及ぼす影響は小さいことが分かった。



(a) 回転粘度計試験



(b) J型フロー試験

図-8 高性能AE減水剤添加量とレオロジー一定数 (120分経過時点)

3.3 水セメント比の影響

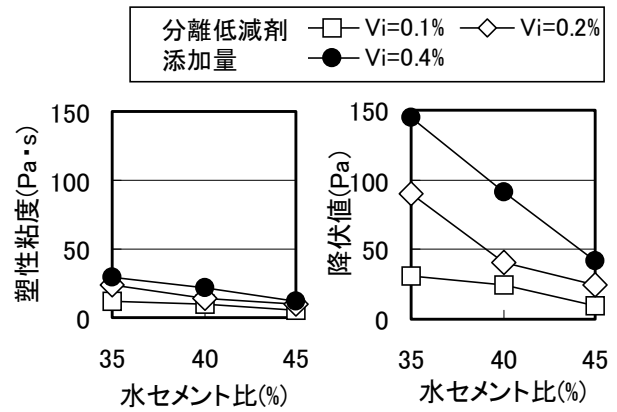
高性能AE減水剤の添加量を2.0%一定とし、水セメント比を35% (S/C=1.4), 40% (S/C=1.5) および45% (S/C=1.6)と変化させたモルタルについて、水セメント比が塑性粘度および降伏値に及ぼす効果を調べた。練混ぜ開始後120分経過時点での回転粘度計試験結果を図-9(a)に、J型フロー試験結果を図-9(b)に示す。両試験結果ともに、同じ傾向を示しており、水セメント比を大きくすると塑性粘度および降伏値は減少し、その減少割合は分離低減剤量が多いほど大きくなっている。今回のようにペースト容積と細骨材容積の比率が一定となるように単位水量を変化させたモルタルについては、水セメント比を大きくすると塑性粘度および降伏値ともに減少することが確認された。

3.4 経時変化

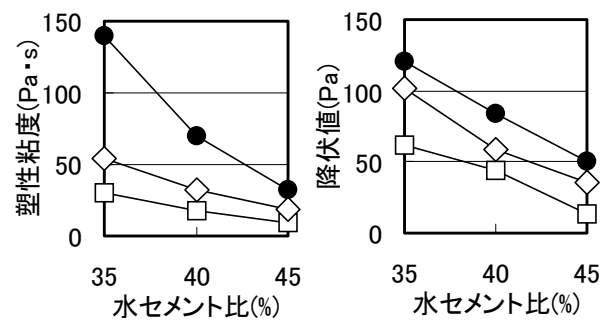
図-10は、水セメント比40%で高性能AE減水剤量が2.0%のモルタルについて、塑性粘度および降伏値の経時変化を回転粘度計にて測定した結果である。このように塑性粘度は分離低減剤の量が多いほど高いが、経過時間とともに微増し、その増加割合は分離低減剤の量によってあまり変化がない。降伏値も経過時間とともに増加するが、その増加割合は、分離低減剤量を多くするに従い大きくなる傾向を示した。また、高性能AE減水剤量が1.5%および2.5%のモルタルも同様な傾向を示しており、特に高性能AE減水剤の添加量が多くなるに従い、分離低減剤量が0.2%および0.4%と多いモルタルの降伏値は、経過時間とともに大きく増加した。

4. 流動性試験の比較

図-11に練混ぜ開始後120分経過したモルタルについて、回転粘度計試験とJ型フロー試験の結果を比較した一例を示す。このように、塑性粘度に関しては、J型フロー試験による値は、回転粘度計による値より大きく、その差は分離低減剤量の増加とともに大きくなっている。一方、降伏値に関しては、両試験により得られた



(a) 回転粘度計試験



(b) J型フロー試験

図-9 水セメント比とレオロジー定数 (120分経過時点)

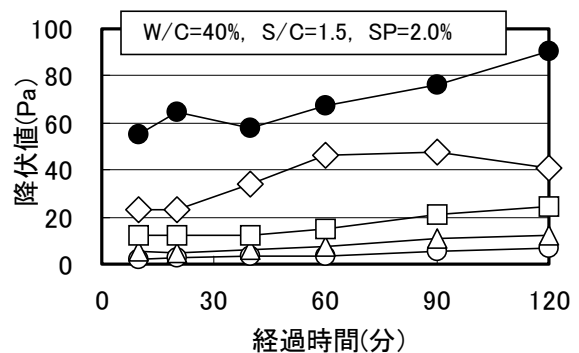
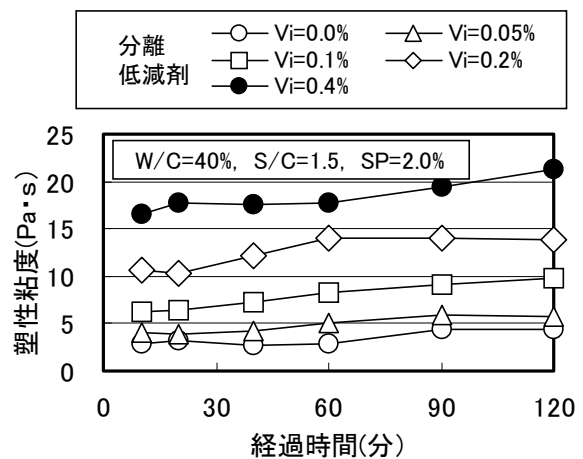


図-10 経過時間とレオロジー定数

値は、ほぼ同じ値を示した。また、図-12 は別途試験として行った練混ぜ直後のモルタルの試験結果であるが、同様な傾向を示した。

回転粘度計試験は外円筒の回転数を順次上げていくことにより、広範囲のせん断応力とせん断速度の関係を測定しているが、外円筒の強制的な回転に伴い粘度の小さいモルタルは円筒表面でスリップし、また、回転速度を連続的に上げながら長時間計測するために、ローター周囲に材料分離を示すラミネーションが発生する場合もある。写真-1 に、ラミネーションの発生状況を示す。このような原因により、調合によれば回転粘度計試験では、塑性粘度の値が実際の粘度よりも小さくなると考えられる。

これに対し、J型フロー試験は導管内のモルタルの圧力差を駆動圧とし、モルタルの自然流下を利用した試験法であり、そのため、回転粘度計試験に比べ、モルタル内に生じさせるせん断速度に無理がなく、実用的な低せん断速度域におけるせん断速度とせん断応力との関係が精度良く測定できたものと考えられる。また、J型フロー試験は導管内を自然流下しがたい塑性粘度（約 140Pa・s）以上の場合には、試料の測定が困難であった。

5. まとめ

本研究の範囲内で、以下のことが言える。

- 1)モルタルの流動特性はJ型フロー試験による塑性粘度と降伏値により判定できる。
- 2) J型フロー試験は、本実験に用いたモルタルの調合については、回転粘度計試験よりも塑性粘度の値を感度良く測定できた。
- 3) J型フロー試験で得られる降伏値は、本実験に用いたモルタルの調合については、回転粘度計試験による値とほぼ同じであった。
- 4)分離低減剤量を増すと塑性粘度および降伏値は増加する。
- 5)高性能AE減水剤量を増すと降伏値は低下し、塑性粘度はあまり影響を受けない。
- 6)塑性粘度と降伏値は経過時間と伴に大きくな

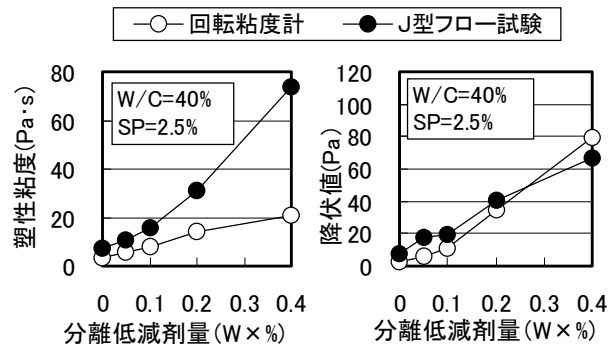


図-11 回転粘度計試験とJ型フロー試験の比較（120分経過時点）

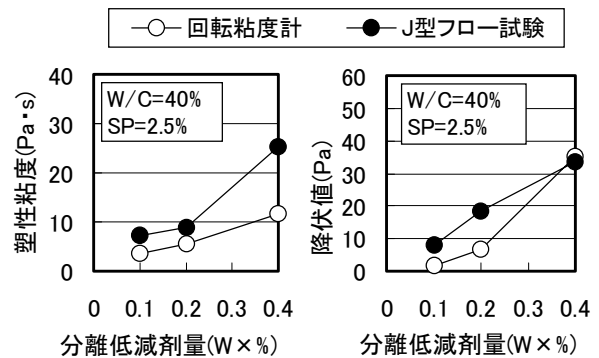


図-12 回転粘度計試験とJ型フロー試験の比較（練混ぜ直後）



写真-1 ラミネーションの発生

る。降伏値については、その増加割合は分離低減剤の添加量が多いほど大きくなる。

参考文献

- 1) 山本康弘ほか：高流動コンクリートの流動特性と充填およびコンクリートの品質に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，No.523，pp.25-31,1999.9
- 2) 村田二郎ほか：回転粘度計におけるフレッシュコンクリートの流動解析，セメント技術年報 No.29，pp.204-207,1975