

# 論文 J型フロー試験の精度向上のための実験的研究

本間 礼人\*1 山本 康弘\*2

**要旨:** 本研究では高流動コンクリートの流動性の評価方法として導管粘度計として開発したJ字型フロー試験の曲管部分の抵抗を排除したレオロジー試験である直管型粘度計試験を提案し,高流動コンクリートのレオロジー特性の測定を行った。その結果,剪断速度の比較的小さい高粘度係数領域と,剪断速度の比較的大きい低粘度係数領域とが存在することがわかった。また,高粘度係数領域においては,J型フロー試験での流動曲線を簡便に補正できることがわかった。

**キーワード:** 高流動コンクリート,レオロジー,J型フロー試験器,粘度係数,剪断応力降伏値

## 1. はじめに

今日,コンクリート打設時の省力化・合理化を目的として,優れた流動性と材料分離抵抗性を持つ高流動コンクリートの利用も普及しつつある。しかし,現段階でそのフレッシュ性状を物理量として数値的に捉えることは難しいため,様々な試みが続けられている。

筆者らはこれまで,高流動コンクリートのビンガム流体としてのレオロジー定数(粘度係数および剪断応力降伏値)を正確かつ定量的に評価することができるJ型フロー試験を開発し<sup>1)</sup>,実験データの蓄積を行ってきた<sup>2)3)</sup>。

本稿では,J型フロー試験器を用いて,高流動コンクリートのレオロジー特性を把握・評価し,さらに直管型導管粘度計試験によってJ型フロー試験器の曲管部における抵抗を検討してJ型フロー試験の精度向上を図ることを目的とした。

## 2. 高流動コンクリートの試験

### 2.1 使用材料及び調合

使用材料を表1に示す。粗骨材は,比較し検討する為に2種類(形状の異なるもの)を用いた。粗骨材Aは角のある形状をしており,粗骨材Bは川砂利と同様の形状である。これらの粗骨材の粒度分布と粗粒率を図-1に示す。

高流動コンクリートの調合は表2に示す通りである。W/Cは35%とし,s/aは54.3%固定

とした。また,表2には各種流動性試験の結果も合わせて示している。なお,流動性判定は目視で行った。

表1 使用材料

セメント	A社製 普通ポルトランドセメント (密度 3.16)
細骨材	福井県坂井郡丸岡産陸砂 (表乾密度 2.56)
粗骨材	福井県坂井郡丸岡産陸砂利 (表乾密度 2.59) 福井県福井市荒木新保産陸砂利 (表乾密度 2.59)
混和剤	B社製高性能 AE 減水剤

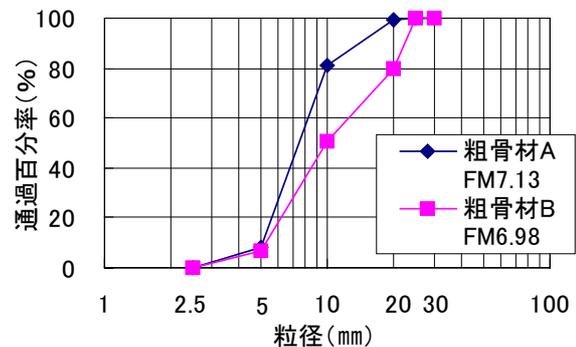


図-1 使用した粗骨材の粒度分布

### 2.2 試験方法

#### 1)スランプ・スランプフロー試験

JISA1101 に則ったスランプ試験を行い,同時にスランプフローを測定した。

#### 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

\*1 福井大学 工学部 建築建設工学科 講師 博士(工学)

\*2 東京工芸大学 工学部 建築学科 教授 工学博士

表 - 2 高流動コンクリートの調合と試験結果

記号	W/C (%)	C (kg)	W (kg)	G (kg)	S (kg)	WRA (Cx%)	s/a (%)	SF (cm)	SL (cm)	粘度係数 (Pa·sec)	剪断応力降伏値 (Pa)	流動性
JA	35	576	201	783	932	0.79	54.3	56.5	23.5	40.78	123.52	並
JA	35	576	201	783	932	0.83	54.3	64.5	25.0	51.41	80.21	良好
JA	35	576	201	783	932	0.83	54.3	64	26.0	35.49	57.76	良好
JA	35	576	201	783	932	0.83	54.3	56.5	24.5	40.72	119.46	並
JA	35	576	201	783	932	0.83	54.3	49	24.0	39.33	113.47	並
SA	35	576	201	783	932	0.83	54.3	-	-	21.66	147.94	
JB	35	576	201	783	932	0.83	54.3	69	26.0	38.66	45.66	良好
JB	35	576	201	783	932	0.83	54.3	59.5	25.0	56.08	86.41	流動不良
JB	35	576	201	783	932	0.70	54.3	59.5	25.5	17.67	62.40	分離
JB	35	576	201	783	932	0.83	54.3	59	24.5	62.73	42.74	良好
JB	35	576	201	783	932	0.83	54.3	53.5	25.5	65.79	44.84	良好
SB	35	576	201	783	932	0.83	54.3	-	-	17.26	120.79	

\* J: J型フロー試験 S: 直管型導管粘度計試験 A: 丸岡産陸砂利 B: 荒木新産陸砂利  
 ~ : 各バッチナンバー WRA: 高性能 AE 減水剤

ある。管内部にコンクリートを充填して圧力差により流出させ、その際流出速度の計測と共に、流出が停止した時の流出口との高低差を測定する事により、粘度係数や剪断応力降伏値等の流動性状を測定することができる導管粘度計試験である。

なお、J型フロー試験器により得られた測定結果から、剪断応力  $P$  (Pa) 及び剪断速度  $V$  (1/sec) を算出するのは以下の式(1)(2)によった。

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

$$V = \frac{h_{i-1} - h_i}{t_i} \cdot \frac{4}{r} \quad (2)$$

ここに、 $r$  は導管半径(cm)、 $\rho$  はコンクリート密度( $g/cm^3$ )、 $L$  はJ型フロー試験器の基本抵抗長さ (cm)、 $h_i$  は区間  $i$  のコンクリート高さ (cm)、 $t_i$  は区間  $i$  のコンクリート流下時間(sec) である。

### 3) 直管型導管粘度計試験

図 - 3 に直管型導管粘度計試験概念図を示す。この装置は、J型フロー試験における曲管部抵抗を排除する為に長さ約 80cm の J型フロー試験器と同じ管の内部に、1 回り小さい内筒を置いて、コンクリートを充填し、滑車を用いて外側の管を一定重量の錘で引き上げ、剪断応力と剪断速度との関係を調べるものである。錘の重量を約

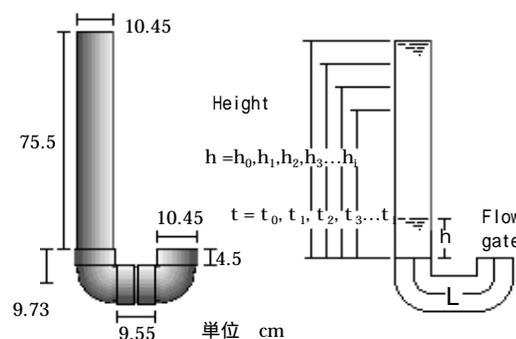


図 - 2 J型フロー試験器

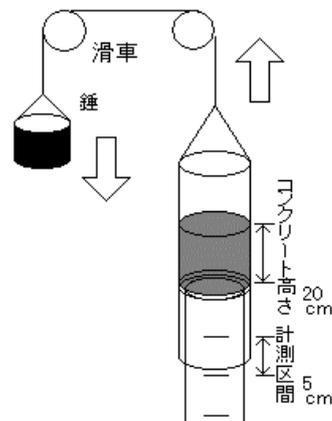


図 - 3 直管型導管粘度計試験器概念図

$P$  剪断応力 (Pa)       $F$  駆動力 (gf)  
 $r$  導管半径 (cm)       $L$  充填コンクリート高 (cm)  
 $V$  剪断速度 (1/sec)       $h$  引き上げ距離 (cm)  
 $t$  引き上げ時間 (sec)

3000gf, 3500gf, 4000gf, 4500gf, 4600gf の 5 通りに変化させて応力を変化させた。このときの引き上げるのにかかる時間を計測した。

このときの錘の重さおよび、充填したコンクリ

ートの高さ $h$ と速度 $V$ より剪断応力 $P$ (Pa)(式(3))と剪断速度 $V$ (1/sec)(式(4))を求めた。

$$P = \frac{\Delta F}{2 \pi r l} \quad (3)$$

$$V = \frac{\Delta h}{t} \cdot \frac{4}{r} \quad (4)$$

試験時には、経時変化による影響を極力避けるため、コンクリートの練り上がり直後に試験を行うようにし、準備時間を除けば同時といえるように3~5本の直管型導管粘度計試験器を用意して、それぞれ錘の重量を変えながら試験を行った。

### 3. 各種試験データと考察

J型フロー試験により得られた流動曲線を図-4に示す。図中JAは粗骨材Aを使用したコンクリートを、JBは粗骨材Bを使用したコンクリートの実験結果を示す。

最大剪断速度を示す剪断応力以下に対応する全データをプロットし近似した結果、粗骨材A使用時は粘度係数 $\mu = 41.84$  (Pa·sec)、断応力降伏値 $F_0 = 108.87$ (Pa)となった。

また、粗骨材B使用時は $\mu = 45.25$ (Pa·sec)、 $F_0 = 49.85$ (Pa)となった。これより粘度係数については粗骨材Bを用いたコンクリートの方が若干大きいことが分かる。一方、剪断応力降伏値については粗骨材Aが高く、角がある形状から接触摩擦等の影響を受けたものと考えられる。

図-5に直管型導管粘度計試験の結果を示す。図-5に示されているように粗骨材Aよりも粗骨材Bの方が上方にプロットされており、より流動し易いことが解る。こちらもJ型フロー試験と同様に粗骨材の性状が大きく影響しているものと考えられる。

### 4. J型フロー試験と直管型導管粘度計試験の比較・検討

#### 4.1 流動試験の比較

2種類の試験に関する流動曲線の関係を図-6に示す。

図-6より、直管型導管粘度計試験のデータがJ型フロー試験によるデータよりも上方にある

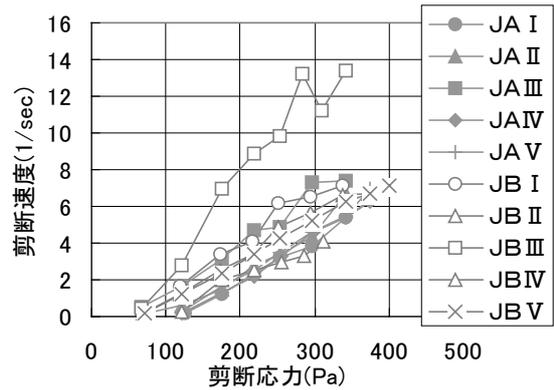


図-4 J型フロー試験による流動曲線

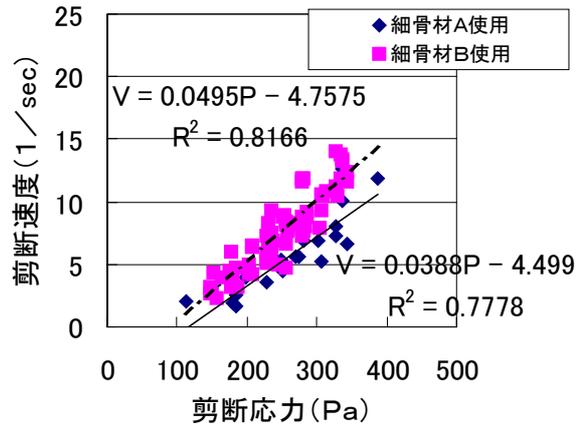


図-5 直管型導管粘度計試験による流動曲線

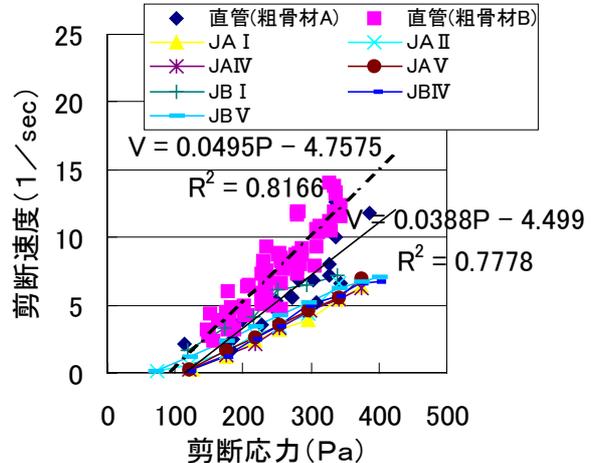


図-6 流動曲線の比較

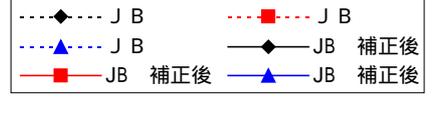
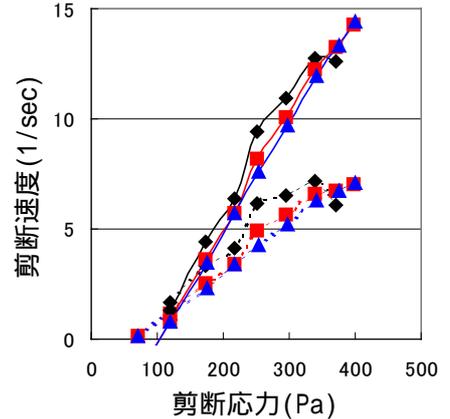
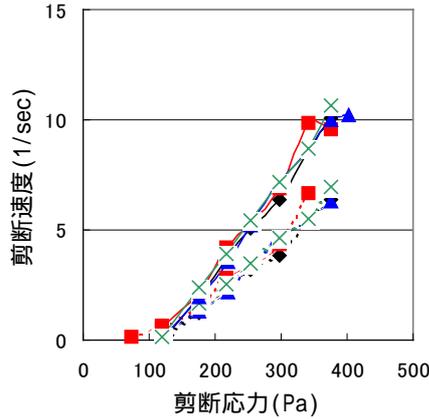
事は、曲管部における摩擦抵抗等の影響があることを示しており、この差を補正することで、J型フロー試験をより厳密な試験とすることができる。ここで、J型フロー試験の流動曲線と直管型導管粘度計試験の近似直線によって、剪断応力 $P$ と剪断速度 $V$ の関係式(5),(6)が導き出される。

$$V_{(A)} = 0.0149 P - 1.8971 + V_{(JA)} \quad (5)$$

$$V_{(B)} = 0.0274 P - 3.6559 + V_{(JB)} \quad (6)$$

式中、 $V_{(A)}$ 、 $V_{(JA)}$ はそれぞれ粗骨材 A 使用のコンクリートの直管型導管粘度計試験による剪断速度、J 型フロー試験による剪断速度を表す。 $V_{(B)}$ 、 $V_{(JB)}$ も同様である。

これらの式より、流動曲線を補正すると、粗骨材 A は図 - 7、粗骨材 B は図 - 8 の様な流動曲線となる。



この操作によって J 型フロー試験器の曲管部の影響を補正でき、これは速度に依存する応力減少が存在することを意味する。また、J 型フロー試験では、近似直線の  $R^2$  値についても 0.95 と安定したデータが得られているのに対し、直管型導管粘度計試験では近似直線の  $R^2$  値が 0.77 前後と実験データにばらつきが見られる事から簡便な J 型フロー試験を正確に補正する意義は大きいと思われる。

しかし、粗骨材の種類によって、補正值が異なる結果となったため、剪断応力 - 剪断速度の関係から試験器固有の抵抗値を求めることは困難であった。

## 5. 落下高さを増した J 型フロー試験

### 5.1 試験の目的

前節では、J 型フロー試験器曲管部での応力減少によって剪断速度が減速されるという前提で流動曲線の補正を行ったが、直管型導管粘度計試験では従来の J 型フロー試験では見られない大きな剪断速度が計測されているため、J 型フロー試験において剪断速度が大きい場合との比較検討を行う必要がある。そこで、直管型導管粘度計試験時に見られる剪断速度のレベルに到達させるため、J 型フロー試験器の大型化を試みた。

### 5.2 使用材料および調合

使用材料は表 - 1 と同じである。ただし、粗骨材に関しては、流動曲線が安定していた粗骨材 A のみを使用した。高流動コンクリートの調合を

図 - 7 粗骨材 A 使用のコンクリートの流動曲線

図 - 8 粗骨材 B 使用のコンクリートの流動曲線

表 - 3 コンクリートの調合

調合番号	W/C (%)	s/a (%)	C (kg)	W (kg)	G (kg)	S (kg)	WRA (Cx%)
1~12	35.0	55	534.54	187.1	726.7	863.9	0.75%

WRA：高性能 AE 減水剤

表 - 3 に示す

### 5.3 試験方法

スランプ・スランプフロー試験、J 型フロー試験と直管型導管粘度計試験を行った。また上記の目的のため、J 型フロー試験器は充填側のパイプ高さを 75cm、120cm の二水準としている。

### 5.4 各種試験結果と考察

試験結果を表 - 4 に示す。以下、120cm の J 型フロー試験器を使った試験結果を J-120、75cm の J 型フロー試験器を使った試験結果を J-75 と記す。

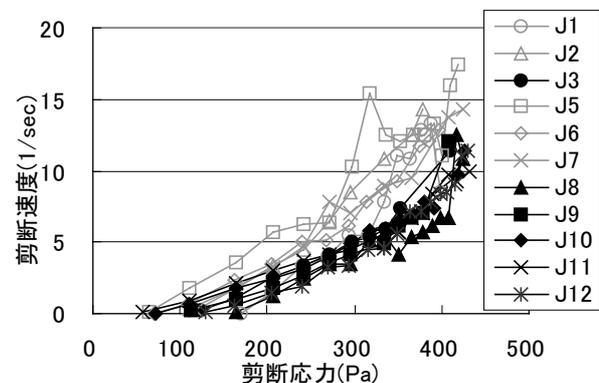


図 - 9 J 型フロー試験による流動曲線(J-120)

### 1) J型フロー試験結果

図-9に、J-120の試験結果を、また、図-10にJ-75の試験結果を示す。図-9,10中で灰色の線のものは、データが不安定か、分離気味のため、考察対象から外したものを示す。また、図中のJxはxバッチ目のコンクリートのJ型フロー試験によるデータを示す。

これから、J-120の流動曲線はある一定の剪断応力を超えると急激に剪断速度が上昇する傾向があることがわかる。

また、図-11にJ-120, J-75の両方をプロットし、近似直線を描いた図を示す。これより、J-120の方は近似直線が2つの傾きを持ち、低粘度係数域・高粘度係数域の2つの粘度係数域をもつことがわかる。図中にそれぞれの近似直線およびR<sup>2</sup>乗値をJ-120高粘度・J-120低粘度として示す。また、J-75とJ-120の高粘度係数域の近似直線はほとんど一致しており、ばらつきも小さい。一方、J-120の低粘度係数域はJ-75とJ-120の高粘度係数域と比べると遥かにばらつきが大きい。

### 2) 直管型導管粘度計試験結果

一方、直管型導管粘度計試験から得られた流動曲線には、折れているような部分があり、低粘度係数域・高粘度係数域の2種類の粘度係数域を持つもの、および1種類だけの粘度係数域を持つものが見られた。

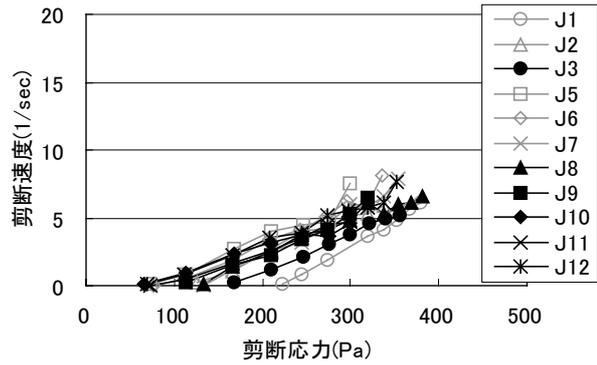


図-10 J型フロー試験による流動曲線(J-75)

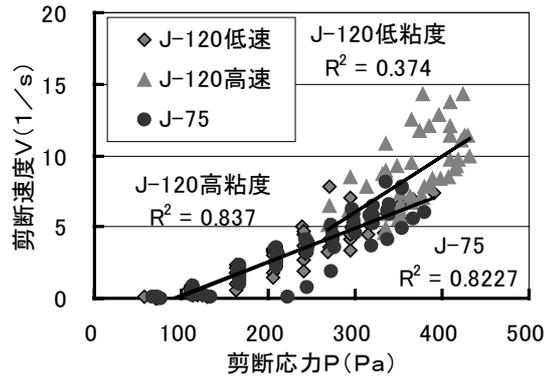


図-11 J型フロー試験による流動曲線の近似

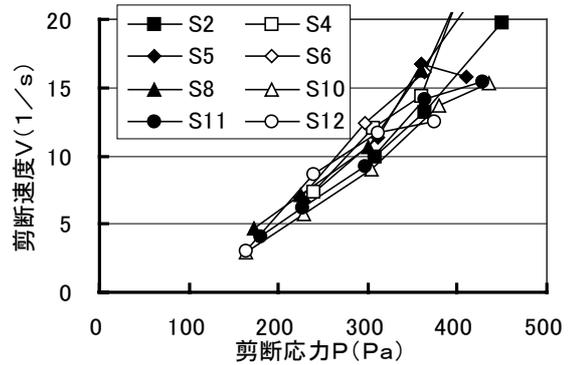


図-12 直管型粘度計試験による流動曲線(その1)

表-4 高流動コンクリートの流動性試験結果

バッチ番号	SL (cm)	SF (cm)	J-75 粘度係数 (Pa·sec)	J-120高 粘度係数 (Pa·sec)	J-120低 粘度係数 (Pa·sec)	J-75剪断 応力降伏値(Pa)	J-120 剪断 応力降伏値(Pa)	バッチ番号	直管試験 粘度係数 (高) (Pa·sec)	直管試験 粘度係数 (低) (Pa·sec)
1	25.2	47.9	26.53	25.77	7.68	216.42	153.36	S1	37.04	8.81
2	23.0	57.5	36.90	30.96	14.71	111.41	78.47	S2	-	14.41
3	21.0	53.5	35.71	36.50	13.76	141.82	108.44	S3	42.37	5.36
4	24.8	66.5	-	36.36	12.97	-	65.01	S4	-	9.55
5	24.0	67.5	31.55	30.96	5.13	66.18	49.91	S5	-	13.32
6	25.0	62.8	32.47	33.56	16.10	72.53	63.94	S6	-	11.27
7	23.5	57.9	30.03	26.25	14.95	123.34	96.85	S7	31.35	15.82
8	22.5	47.2	39.22	35.46	13.19	125.01	139.17	S8	-	14.35
9	23.5	53.3	34.84	45.45	10.64	80.16	85.19	S9	53.19	16.26
10	25.5	63.6	54.35	41.67	19.92	48.3	62.21	S10	-	21.23
11	23.5	60.0	45.05	51.28	17.89	64.13	30.98	S11	-	20.66
12	23.5	55.9	40.16	43.10	15.43	57.48	129.56	S12	-	16.78

図 - 12 及び図 - 13 に直管型導管粘度計試験による試験結果を示す。図中, Sx は x バッチ目のコンクリートの直管型粘度計試験によるデータを示す。図 - 12 は単一の粘度係数を持つもの、図 - 13 は J-120 と同様、二つの粘度係数を持つものである。

図 - 11 に直管型導管粘度計試験の粘度係数域を 2 種類持つものの近似直線を加えたものを図 - 14 に示す。図中、直管粘度計試験で得られた高粘度係数域・低粘度係数域の近似直線および R<sup>2</sup> 乗値をそれぞれ直管高粘度・直管低粘度として示す。

図 - 14, 表 - 3 よりそれぞれの粘度係数を比較してみると、直管型導管粘度計試験の低粘度係数域の粘度係数が、J-120 のそれと大きく異なる値になっているが、直管型導管粘度計試験の高粘度係数域と J-75 及び、J-120 の高粘度係数域の粘度係数はかなり近い値となっている。また、このグラフから、J 型フロー試験における高粘度係数部分の傾きを原点方向に平行移動すれば直管型粘度計試験とほぼ重ねることができ、J 型フロー試験器における圧力損失の補正が可能であると考えられる。しかし、流動速度が大きい場合には低粘度係数域となり、補正はこの方法では行えない。

本研究では一次直線による補正式を提案したが、これも粗骨材の変化によって影響を受け、あらゆる状況で適応できるかどうかは多種にわたる骨材による検証を要する。また、この領域では剪断速度が大きい場合、管壁との摩擦の影響が無視できなくなっている可能性もあり、混練時の気温など外部条件によるデータのばらつきを小さくすることと共に今後の検討課題である。

## 6. まとめ

本研究における流動特性の検討より、得られた知見は次のようになった。

1. J 型フロー試験は粗骨材の形状の差がコンクリートのレオロジー特性に与える影響を検出できる。
2. 落下高さを増した J 型フロー試験では、粘

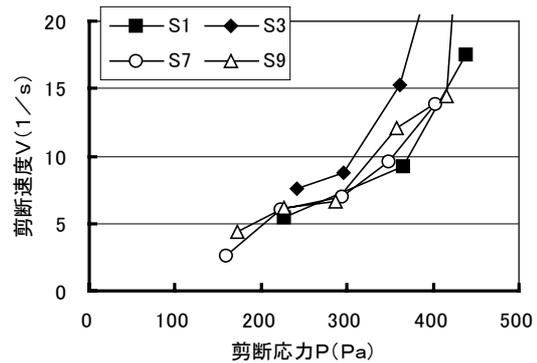


図 - 13 直管型粘度計試験による流動曲線(その 2)

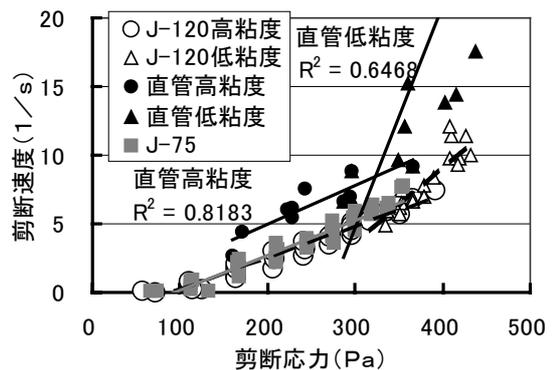


図 - 14 各試験による流動曲線の比較

度係数が二通り出現し、直管型導管粘度計試験においても条件によっては二つの粘度係数として現れる。

3. J 型フロー試験での粘度係数の大きい領域は、直管型導管粘度計試験結果から簡便に補正することができるが、剪断速度の大きい領域ではデータのばらつきも大きく、統一した補正には更なる検討が必要である。

## 謝辞

本研究は、鵜飼大貴、坂本修一、高橋佳紀、山本乃梨子氏の卒業研究を取りまとめたものです。各氏のご協力に感謝の意を表します。

## 参考文献:

- 1) 山本康弘, 本間 礼人, 橘高義典: 高流動コンクリートの流動特性の試験方法(J 型フロー試験)に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 489 号 pp.9-16,1996.11
- 2) 山本康弘, 小野山貫造, 本間 礼人, 許啓文: 高流動コンクリートの流動特性と充填性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, 第 523 号 pp.25-31,1999.9
- 3) 本間 礼人,山本康弘: 高流動コンクリートの調合要因が流動特性に及ぼす効果に関する研究,コンクリート工学年次論文集,第 22 巻,第 2 号,pp361 ~ 366(2000)