

# 論文 高流動コンクリートの流動性評価方法に関する研究

本間 礼人<sup>\*1</sup> 山本 康弘<sup>\*2</sup>

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J字型の導管を使用したレオロジー試験を提案し、各種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、回転粘度計と同様の流動曲線が得られた他、相対粘度係数、相対初期剪断応力降伏値を測定できると共に、高流動コンクリートとして適切なレオロジー特性の範囲を決定出来た。また、スランプフローとの関連性についても明確にすることが出来た。

キーワード：高流動コンクリート、レオロジー特性、相対粘度係数、相対初期剪断応力降伏値

## 1. はじめに

近年、施工の省力化やコンクリートの高品質化のために、高い流動性と材料分離抵抗性を備えた高流動コンクリートの実用化が進んでいる。しかし今の所、高流動コンクリートの基本的性質を物理量として数値的に捉えその施工性を確実に判定することは難しく、施工性判定試験方法の確立の必要に迫られている。そのため、筆者らは昨年より、高流動コンクリートの流動解析に必要なレオロジー特性を把握するため、さまざまな試験装置を試作、検討してきた。

本研究では、J字型の導管を用いたJフロー試験を提案し、様々な調合の高流動コンクリートの流動性を測定し従来の試験方法と比較、検討する。

## 2. 実験計画

### 2-1. 使用材料

使用材料を表-1に示す。砂は表に示す2つのものを粒度分布がフラー曲線に近づく様に、細目砂：粗目砂=1：9の比率で混合して用いた。細骨材率については、骨材総重量を一定として細骨材率のみを変えながら、骨材をΦ15cm×30cmの円筒形型枠に充填する最密充填試験を行い、充填された骨材の高さを測定し、骨材が最密充填状態となる細骨材率を求めた。結果は図-1の通りであり、細骨材率50%前後で最密状態となった。次に、セメントについては普通、高炉B及びBライトの3種類について検討した。

### 2-2. 調合計画

実験の対象とした高流動コンクリートの計画調合表を表-2に示す。骨材が最密充填状態に近い場合に良好な流動性が得られるとの報告もあり<sup>1)</sup>、本実験においては細骨材率を50%とした。ま

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント	比重3.16
	高炉セメントB種	比重3.04
	Bライトセメント	比重3.23
細骨材	相模川産川砂(細目)	表乾比重2.59
	君津産陸砂(粗目)	表乾比重2.58
粗骨材	奥多摩産砂岩	表乾比重2.59
混和剤	AE剤 (山宗化学株式会社製ヴェインソル) 高性能AE減水剤(花王社製マイティ2000WHZ)	

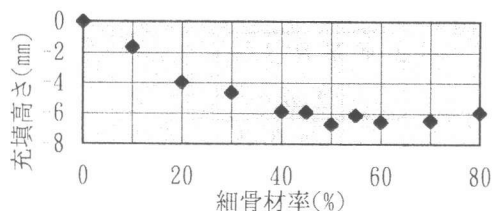


図-1 細骨材率と充填の様子

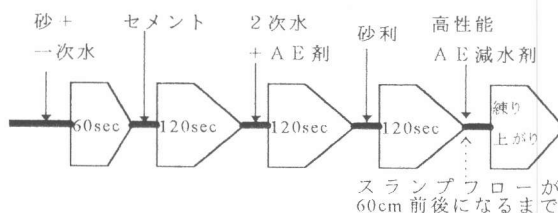


図-2 練り混ぜフロー図

\*1東京都立大学助手 工学部建築学科、工修 (正会員)

\*2東京都立大学教授 工学部建築学科、工博 (正会員)

た水セメント比は20~40%の範囲で変化させた。また、各コンクリートのスランプ試験結果を表-2に示した。

### 2-3. 製造方法

練混ぜは強制攪拌ミキサを使用し、図-2に示す分割練りを行った。高流動化剤は、コンクリート性状を見ながら攪拌中のミキサに投入し、スランプフローが60cm前後になる様に調節した。

### 3. 試験方法

従来よりの高流動コンクリートの流動性試験方法としては、スランプ・ス

ランプフロー試験、Lフロー試験を行った。Lフロー試験については図-3に示す試験器を使用した。また、スランプフロー測定時の性状を目視で観察するとともにフロー終了までの時間及び終了後の内外粗骨材比を求めた。そして、これらの試験とは別に、図-4~6及び写真-1~2に示す様な回転粘度計及びJフロー試験を行った。

#### a. 回転粘度計試験

装置の概要を図-4及び写真-1に示す。この回転粘度計は、東京都立大学で昭和30年代に作られた内円筒回転型のもので、外円筒がΦ270mm×350mm、内円筒がΦ140mm×240mmと大きく、コンクリートの様に粗骨材を含む材料での試験が可能である。コンクリートを充填後、内円筒を各種の速度で回転させた場合の内円筒の角速度及びその時点でのトルクを測定した。測定データから、剪断速度 $\tau$ 及び剪断力 $e$ を求める式は以下によった<sup>2)3)</sup>。

$$e = \frac{M}{2\pi h R i^2} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{2\theta_0}{1 - \left(\frac{Ri}{Ro}\right)^2} \quad (2)$$

ここに、 $M$ は内円筒のトルク、 $h$ :内円筒の試料高さ、 $Ri$ 、 $Ro$ :内円筒及び外円筒の半径、 $\theta_0$ :内円筒の角速度、である。

#### b. Jフロー試験

今回の実験に使用したJフロー試験器は各種既往の試験装置を発展させたものである<sup>4)5)</sup>。図-5及び写真-2の様な塩化ビニール製のJ字型のチューブで出来ているもので、導管の内径は粗骨材が閉塞しない程度として109mmとした。そして、十分なコンクリート落下圧力が得ら

表-2 計画調合表及び各種試験の結果

	セメント種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				スランプ (cm)
				W	C	S	G	
N-40	普通	40	50	175	438	848	848	25.1
N-35	普通	35	50	170	488	840	840	23.7
N-30	普通	30	50	159	530	838	838	24.8
N-25	普通	25	50	144	576	839	839	25.1
K-30	高炉B	30	50	159	530	838	838	24.8
K-25	高炉B	25	50	144	576	839	839	26.1
K-23	高炉B	23	50	126	632	816	816	28.0
K-20	高炉B	20	50	126	632	816	816	26.5
B-30	B7A付	30	50	161	539	838	838	26.3
B-25	B7A付	25	50	149	596	817	817	23.0
B-23	B7A付	23	50	142	619	817	817	25.4
B-20	B7A付	20	50	131	655	817	817	25.9

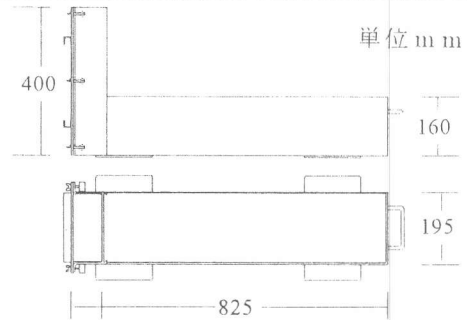


図-3 Lフロー試験器概要図

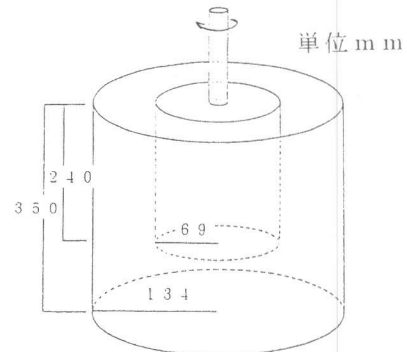


図-4 回転粘度計概要図

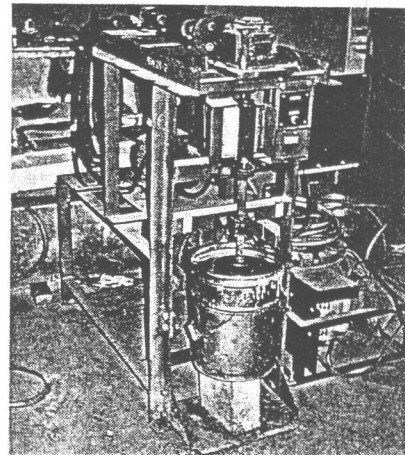


写真-1 使用した回転粘度計

れる様 J 字の口の高低差を 75cm とした。

図-6 に J フロー試験の概念図を示す。測定は、まず、J 字導管にコンクリートを充填する。この時、J 字の低い方の口（以下、溢出口と呼ぶ）からコンクリートが流出しない様に約 6kg の錘を載せたゴムの蓋で閉鎖しておき、J 字の高い側上端までのコンクリートの充填を行う。その後、溢出口のゴム蓋を取り除き、コンクリートを流出させる。その際の高い側の導管内の、コンクリートの落下時間  $t$  を、5cm ごとに測定した。最後にコンクリート流出が停止した時点で高い側のコンクリート上面と溢出口との高低差を測定した。

コンクリートが高さ  $h_0$  から高さ  $h_1$  まで沈降した時のコンクリートの単位高さあたりの落下圧力低下分  $\Delta P$  は位置エネルギー式より以下の式から算出できる。

$$\Delta P = \frac{\rho \cdot \frac{(h_0 + h_1)}{2}}{L + \frac{(h_0 + h_1)}{2}} \quad (3)$$

ここで、 $L$  は溢出口以下の導管の平均長さである。この単位高さあたりの落下圧力低下分  $\Delta P$  は一般に速度圧と呼ばれているもので、これより以下、 $\Delta P$  を速度圧と呼ぶこととする。

次に、区間  $i$  の沈降時間  $t_i$  から、下式により沈降速度  $U$  が求められる。

$$U = \frac{h_{i-1} - h_i}{t_i} \quad (4)$$

J フロー試験では 1 区間 5cm で時間を測定しているので、ここでの  $U$  は 5cm 沈降速度を表している。この  $U$  は化学工学の分野では空塔速度と呼ばれているもので<sup>6)</sup>、以下、 $U$  を空塔速度と呼ぶこととする。ここで図-7(a)(b) にニュートン系流体の流動曲線を示す。回転粘度計を用いた場合は図-7(a) のように剪断応力と剪断速度との関係で表されるが、導管を通過させた場合の流動曲線は図-7(b) のように速度圧と空塔速度の関係で表されるとされ<sup>6)</sup>、この場合、空塔速度  $U$  と落下圧力  $Pu$  との関係は (5) 式で表される。この場合の  $\lambda$  は粘性を表す定数であるので、これを相対粘度係数と呼ぶこととする。また  $l$  は溢出面からコンクリート面までの

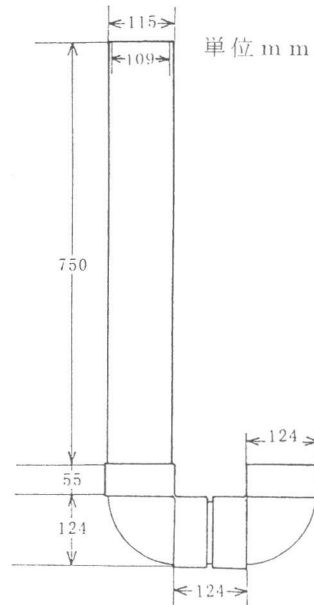


図-5 J フロー試験器詳細図

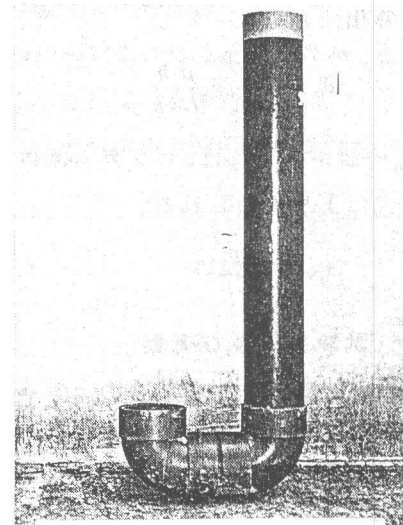


写真-2 J フロー試験器

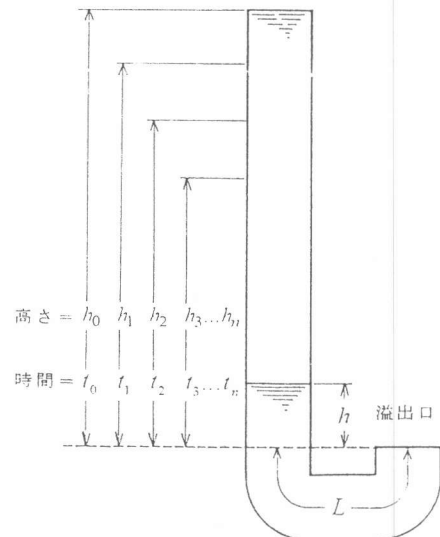


図-6 J フロー試験概念図

平均抵抗長さである。

$$Pu = \lambda \cdot U \cdot l \quad (5)$$

また、ニュートン系流体と同様、ビンガム系流体も回転粘度計と導管による測定とでは座標の対応が異なる。ビンガム系流体の流動曲線を図-8(a)(b)に示す。コンクリートは実際には図-8(b)の

様なビンガム系流体であるため、落下圧力  $Pu$ 、相対粘度係数  $\lambda$ 、空塔速度  $U$  の間に以下の関係式が成立する。

$$Pu = \lambda \cdot U \cdot l + F_0 \cdot l \quad (6)$$

この場合の  $F_0$  は、初期剪断応力降伏値を表す定数であるので、ここでは相対初期剪断応力降伏値と呼ぶこととする。Jフロー試験で得られたレベル差を  $h$  とすると、コンクリートが停止したとき ( $U = 0$ ) の平均抵抗長さは  $l = h + L$  であるので、相対初期剪断応力降伏値  $F_0$  は以下の式により算出できる。

$$F_0 = \frac{Pu}{L+h} = \frac{\rho \cdot h}{L+h} \quad (7)$$

$F_0$  の値が求めれば、ビンガム流体の場合の  $\lambda$  は以下の式により求められる。

$$\lambda = \frac{Pu - F_0 \cdot l}{U \cdot l} \quad (5')$$

#### 4. 試験結果及び考察

表-2に示した各調合のコンクリートについて、表-3にスランブ・スランブフロー試験、Lフロー試験、フロー終了までの時間、終了後の内外粗骨材比、変換後のJフロー試験結果及びスランブフロー測定時の性状の目視観察の結果を示す。また、それらから総合的に判断した施工性を同じく表-3の右側に示す。そして、回転粘度計により得られたデータを図-9に示す。この場合の横軸は剪断力、縦軸は剪断速度である。また、図-10にJフロー試験器により得られたデータを既述の式により変換して示す。横軸は落下圧力  $Pu$  を  $l$  で除した速度圧  $\Delta P$  であり、縦軸は空塔速度  $U$  である。グラフの傾きの逆数は相対粘度係数  $\lambda$  であり、曲線の横軸切片は相対初期剪断応力降伏値  $F_0$  を示している。図-9、図-10に示されている様に、この2つの曲線はよく似ており、Jフロー試験により、回転粘度計と同じ様な相対粘度係数と相対初期剪断応力降伏値が測定ができることが分かる。また、普通セメントで  $W/C=30, 35$ , 高炉セメントで  $W/C=30\%$ , Bライトセメントで  $W/C=25, 30\%$  のものは表-3に示した様に分離現象が見られ、この事は図-9、図-10の中では曲線の高勾配となって表れている。また、高炉セメントで  $W/C=20$ , Bライトセメントで  $W/C=20, 23\%$  のものは表-3に示した様に高粘性のため施工性が著しく悪化したが、図中では曲線の低勾配として表れている。以上より、施工性と、品質管理の点から、高流動コンクリートにおけるレオロジー特性の適正範囲は図-9、図-10の中で一点鎖線で囲まれた領域(相対粘度係数値  $0.25 \sim 1.0$ )の間と考えられる。また、この一点鎖線部より上側では分離傾向が見られ、下側では高粘性による流動不良の傾向があることを示しているが、これらのコンクリートはいずれもスランブフローでは  $60\text{cm}$  を超えており、スランブフロー値では分離傾向・過剰粘性による流動不良の問題は検出することが出来なかったと言える。また、図-9に示されている高炉セメント  $25\%$  のものは曲線の途中で急激な立ち上がりが見られるが、この調合はコンクリートと回転粘度計の内円筒との間の滑りが目視で観測されており、滑りのため正確に計測できなかったためと思われる。

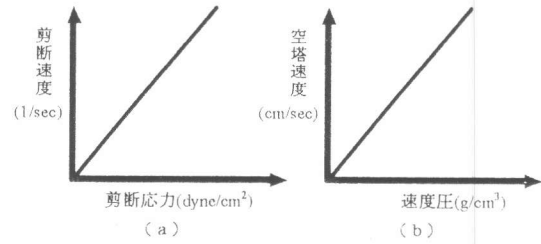


図-7 ニュートン系流体の流動特性

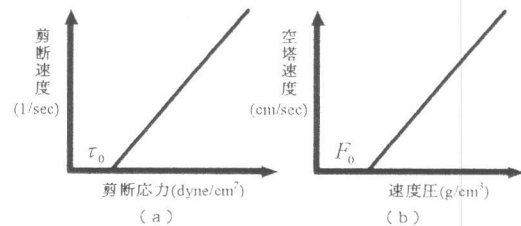


図-8 ビンガム系流体の流動特性

表-3 高流動コンクリートの流動性試験の結果(一部再掲)

	セメント種類	W/C (%)	スランブ (cm)	スランブフロー (cm)	Lフロー (cm)	スランブ+終了までの時間(sec)	内外粗骨材比	相対初期剪断応力降伏値	相対粘度係数	目視による施工性判定	総合的に判断した流動性判定
N-40	普通	40	25.1	52.5	-	2	-	0.3510	0.0334	分離傾向	分離傾向
N-35	普通	35	23.7	42.5	-	7	1.27	0.3767	0.0528	分離傾向	分離傾向
N-30	普通	30	26.4	58	66.5	20	1.18	0.5820	0.0905	やや分離	やや分離
N-25	普通	25	23.7	65.5	51.5	28	-	1.8667	0.6521	やや分離	やや分離
K-30	高炉B	30	24.8	59.7	60.5	14	1.28	0.1757	0.2084	良好	やや分離
K-25	高炉B	25	26.1	65.5	85	19	0.99	0.1468	0.5572	良好	良好
K-23	高炉B	23	28.0	69.5	82.5	29	1.08	0.1434	0.3345	やや分離	良好
K-20	高炉B	20	26.5	60	72	30	0.97	0.1403	1.1131	流動不良	流動不良
B-30	Bライト	30	26.3	59.5	58	9	1.12	0.2260	0.1283	やや分離	やや分離
B-25	Bライト	25	23.0	59.5	56	18	1.19	0.2233	0.2932	良好	やや分離
B-23	Bライト	23	25.4	59	50	27	1.32	0.4784	1.3788	流動不良	流動不良
B-20	Bライト	20	25.9	59.5	52.8	33	1.21	0.5506	2.0689	流動不良	流動不良

4-2. スランブフロー試験との比較

図-11にスランブフローと相対粘度係数との関係を、図-12にスランブフローと相対初期剪断応力降伏値との関係を示す。図-11中の斜線部は高粘性或いは分離により高流動コンクリートとして適さないことを示す。図-11より、スランブフロー試験では表れない高粘性による流動不良が、相対粘度係数によれば判定が可能であることが分かる。また、図-12に示されている様にスランブフローは相対初期剪断応力降伏値との関係が見られる。図中の斜線部は、流動し始めるのに必要な力が大きすぎ

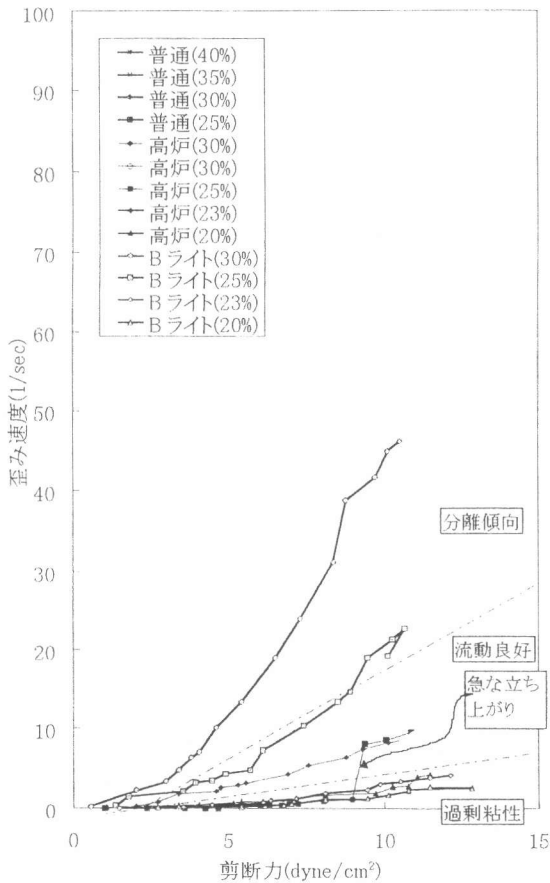


図-9 回転粘度計データ

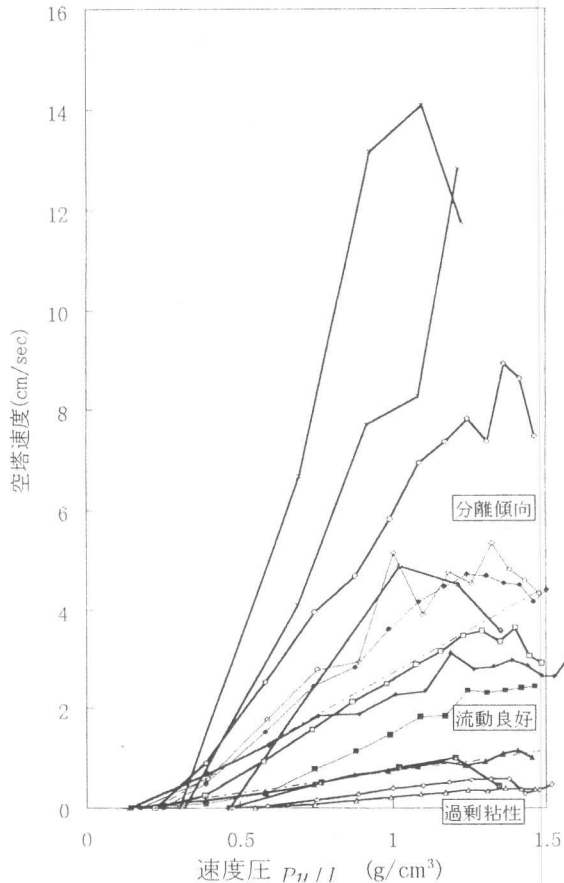


図-10 変換後のJフロー試験器データ

ぎ、高流動コンクリートとして適さないことを示す。ここで、BライトセメントでW/C=20, 23%のものは相対初期剪断応力降伏値が著しく高く、施工性が悪いことを示しているが、スランブフローは約60cmあり、施工性の悪さはスランブフロー試験では検出できていない。

## 5. 結論

以上の結果より、Jフロー試験器について得られた知見をまとめると以下の様になる。

1. Jフロー試験器によりコンクリートの流下速度と最終停止高さを測定することにより、空塔速度と速度圧との関係が得られ、これらは、回転粘度計の剪断速度と剪断力で表される流動性とほぼ同等の性状が把握できる。
2. Jフロー試験器を使用することにより、相対粘度係数と相対初期剪断応力降伏値が測定できる。
3. これらの相対粘度係数と相対初期剪断応力降伏値は回転粘度計で得られる粘性と、初期剪断応力に相当する値が得られる。
4. 回転粘度計の場合、コンクリートの性状によっては（例えば高炉セメントW/C=25%のもの様に）コンクリートと内円筒が滑ってしまうなど、測定不能の場合があるが、Jフロー試験器は自然落下方式なので測定不能になることはなかった。
5. 高流動コンクリートは相対粘度係数では0.25～1.0の範囲が高流動コンクリートとして適切であり、1.0以上の場合打設が困難になる傾向があり、0.25以下の場合材料が分離しやすくなる傾向がある。
6. 高流動コンクリートの相対初期剪断応力降伏値は $0.45\text{g/cm}^3$ 以下が適切であり、それ以上の場合、高流動コンクリートとしては使用が困難である。
7. Jフロー試験により得られる相対初期剪断応力降伏値はスランブフローとの相関性が高い。
8. Jフロー試験による相対粘度係数又は回転粘度計の粘性係数は、従来のスランブフロー値のみでは検出が不十分であった分離性や流動不良を判定できる可能性がある。

## 6. 謝辞

本実験にあたりご助言を頂きました東京都立大学橋高義典助教授、ならびに長期にわたる実験に協力して頂いた平成7年度卒論生羽生将秀君、上村幸恵君に深く感謝致します。

### [参考文献]

- [1] 松岡康訓：超流動コンクリート、コンクリート工学 vol. 31 No. 3, 1993, 3
- [2] 中川鶴太郎, 神戸博太郎：レオロジー、みすず書房、1964
- [3] 笠井芳夫, 池田尚治：コンクリートの試験方法上下巻、技術書房、1993
- [4] 長滝重義, 文 翰英：プレパックドコンクリート用注入モルタルの流動性に関する研究、セメント技術年報XXVIII, 1971
- [5] 加賀秀治, 山本康弘, ほか：減圧注入工法におけるプレパックドコンクリートに関する研究、大成建設技術研究所報 第10号, 1982
- [6] 竹内雍ほか：解説 化学工学、培風館、1994

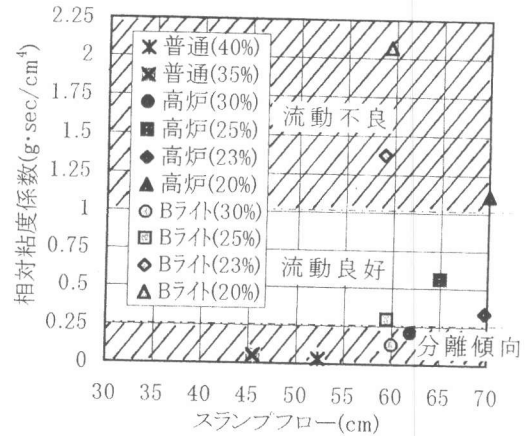


図-11 スランブフローと相対粘度係数

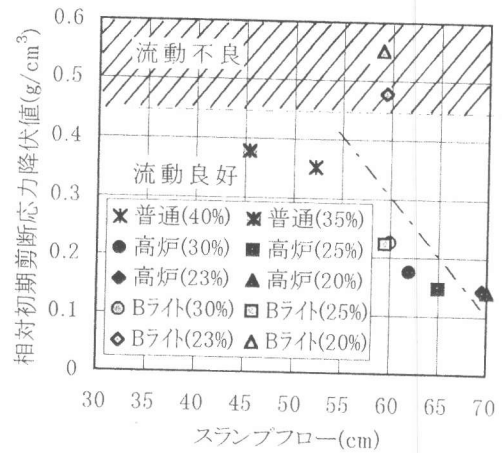


図-12 スランブフローと相対初期剪断応力降伏値