

論文 フレッシュモルタルのレオロジー性質に及ぼす再攪拌の影響

渡辺健治*1 · 小野博宣*2 · 谷川恭雄*3

要旨:本研究では、経時的あるいはポンプ圧送などによって変化していくフレッシュコンクリートのレオロジー的な性質に注目し、これを室内でシミュレートするために、モルタルを用いて実験を行った。また、試料のレオロジー定数を簡易に測定するために、モルタルフロー試験およびJロートを改良した3つのロートを用いて実験を行った。本報では、レオロジー定数の簡易推定手法の適用性の検討を行うとともに、試料のレオロジー性質の経時的な変化および再攪拌による変化の程度を定量的に検討した。その結果、1分間の再攪拌は9分間程度の経時変化に相当することなどが明らかとなった。

キーワード:フレッシュモルタル, レオロジー, モルタルフロー, Jロート

1. はじめに

コンクリートの製造から輸送、場内運搬、打設にいたる過程でワーカビリティの変化を把握することは、良好なコンクリート構造物の製造のために重要である。特にポンプ圧送によるスランプロスは顕著な変化であるが、筆者らは、実機ポンプ圧送実験などを実施することにより、コンクリートのポンプ圧送ロス、静置やミキサによる再攪拌などによるコンシステンシーの変化として予測可能であることを示してきた¹⁾。本研究では、モルタルのレオロジー性質が静置や再攪拌、試験容器内での静置といった条件下でどのように変化するかを検討する。

2. レオロジー定数の簡易推定手法

2.1 モルタルフロー試験

本研究では、降伏値を簡易に推定する手法として、モルタルフロー試験(JISR 5201)を用いた。フローコーンの形状・寸法を図-1に示す。ここで、試料下面の半径に対する上面の半径の比を $a=7/10$ とおき、形状に関する変数 α を式(1)のように定義する。このとき試料の降伏値 τ_y は、モルタルの単位容積質量を $2,200\text{kg/m}^3$ と仮定し、形状に関する変数 α を用いて式(2)のように示すことができる²⁾。

$$\alpha = \frac{1+a+a^2}{3} \quad (1)$$

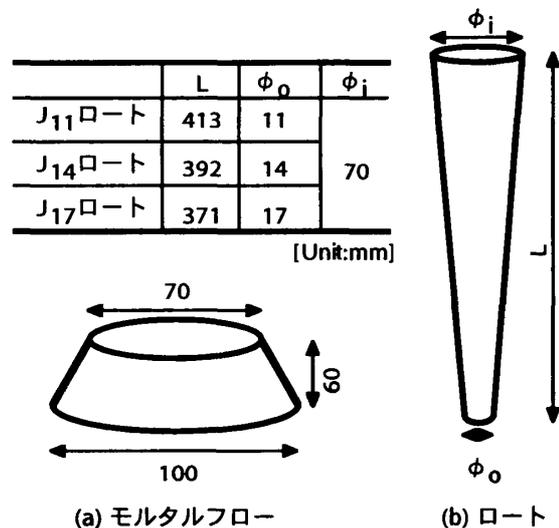


図-1 フローコーンとロートの形状

$$\tau_y = \frac{\rho G \alpha R^2 H}{\sqrt{3}} \frac{1}{r^2} = \frac{1.06}{r^2} \quad (2)$$

ここで、 τ_y :降伏値 (Pa), ρ :単位容積質量 (kg/m^3), G :重力加速度 (m/s^2), R :フローコーンの下面半径 (m), H :フローコーンの高さ (m), r :フローの広がり半径 (m)。

試験では、試料の充填はJIS試験に準ずるが、フローコーン引上げ後の打撃は行わず、静置した状態で流動した拡がりの直径をフロー値($M_0=2r$)とすることにした。コーンや底板との付着・摩擦を無

*1 中部大学講師 工学部建築学科 工博 (正会員)

*2 中部大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

*3 名古屋大学教授 工学研究科建築学専攻 工博 (正会員)

視すれば、このフロー試験では、フローコーンを引き上げた後、試料は自重によって崩れようとする力と変形を止めようとする降伏値が釣り合うまで流動する。したがって流動が停止した時の形状を測定すれば、降伏値を逆算することができる。試料の上面と下面の半径の比 a が流動前後で等しい円錐台であると仮定すれば、高さあるいは拡がりのいずれかを測定することにより、全体の形状を把握することができる。本研究では、簡易試験であることから、試料の拡がりを測定して降伏値を推定することにした。なお、容積既知(約300cc)の容器に充填した試料の試料の重量から単位容積質量を測定したが、単位容積質量を一定とした式(2)を用いて降伏値を推定しており、単位容積質量の影響は無視した。

2.2 ロート流下試験

本研究では、Jロート(土木学会:JSCE-F531)の下部を切断し、3種類のロートを作成した。吐出口の口径をとってそれぞれJ11ロート、J14ロートおよびJ17ロートとここでは呼ぶ。図-1(b)に、ロートの形状・寸法を示す。これらのロートの形状パラメータは表-1のようになる。ロート流下試験では、まず一度試料を充填した後流下させ、その後に本試験として2回流下試験を行った。試験での測定項目は、下部の吐出口を開放してから流下した試料が途切れるまでの時間とした。2回の試験の時間差が1秒以上ある場合は、もう一度流下試験を行って、実験誤差を少なくするようにした。

十分細かいロートを流下する様子をレオロジーの立場から整理すると、ロート内壁面でのすべり抵抗 (τ_R) は式(3)のように与えられる³⁾。モルタルの単位容積質量を $2,200\text{kg/m}^3$ と仮定し、ここで用いているJ11、J14およびJ17ロートに換算すると、それぞれ256、259および263Paとなる。したがっ

て、 τ_R 以上の降伏値を持つ試料はロート内で閉塞することになる。

$$\tau_R = \frac{\rho GR \left(a_f + 1 + \frac{1}{a_f} \right)}{3 \left(1 + \frac{1}{a_f} \right) \sqrt{1 + \Lambda^2}} \quad (3)$$

栓流半径に関するパラメータとなる β を式(4)のようにおく。 β は0~1をとる無次元数で、第3項の係数は、降伏値が小さいあいだはあまり影響がないが、降伏値が200Pa程度の閉塞に近づくと0.3程度にまでなり、栓流半径が大きいほど影響が大きくなるため、省略することはできない。

塑性粘度は、ロートを流下する時間 t を用いて、式(5)のように表すことができる。理論式の詳細は既往の研究³⁾を参照されたい。

$$\beta = 1 - \frac{4}{3} \frac{\tau_y}{\tau_R} + \frac{1}{3} \frac{\tau_y^4}{\tau_R^4} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{3\beta\Lambda^2\rho G t}{8 \left\{ \frac{(z_t - z_b)(z_t + 3z_b)}{2z_b^3} + \frac{1}{z_b} \ln \left(\frac{z_t}{z_b} \right) \right\}} \quad (5)$$

本研究で提案するような、大小3段階の吐出口を持つロートを併用する推定方法を用いれば、ロート内で閉塞する場合や、流下速度が速すぎて測定が難しい場合などに対応しやすいため、1つのロートで測定するよりも適用範囲が広がる。

3. 実験の概要

3.1 材料と調査

本研究で提案する組合せ試験の妥当性を検証するために実験を行った。実験では、普通ポルトランドセメント(密度 $3,150\text{kg/m}^3$)および木曾川産山砂(密度 $2,560\text{kg/m}^3$)を用いた。高性能AE減水剤は、ポリカルボン酸系の標準形(シリーズ名にFを記す)と遅延形(シリーズ名にPを示す)の2銘柄を用いた。化学混和剤を用いない調査はシリーズ名にNと記した。実験で用いた試料の調査を表-2に示す。水セメント比は50%および35%の2水準とし、たとえばN50のように、英字1文字+水セメン

表-1 形状パラメータ

	a_f	Λ	z_t	z_b
J11ロート	0.157	0.0714	0.490	0.077
J14ロート	0.200	0.0714	0.490	0.098
J17ロート	0.243	0.0714	0.490	0.119

註) a_f : ロート上面と下面の半径の比率に爛する係数, Λ : ロートのテーパー率, z_t, z_b : ロートの長さに関するパラメータ(m)。

ト比でシリーズ名を表すこととした。W/C=50%および35%の場合でそれぞれ練上り時の目標 M_{10} を180mmおよび210mm (±5mm) とした。コンシステンシーの調整には、W/C=50%の場合は砂セメント比 (S/C) を調節し、W/C=35%の場合は高性能AE減水剤の添加量で調節した。

表-2 調査表

Series	W/C	S/C	Ad	備考
N50	50%	1.6	-	ブレーン
F35	35%	1.3	0.48%C	標準型
P35	35%	1.3	0.77%C	遅延型

註) W/C:水セメント比, S/C:砂セメント比, Ad:高性能AE減水剤添加量。

表-3 経時変化実験結果の一覧 (実験-1)

Series	静置時間 分	単位容積質量 kg/m ³	0打 モルタル フロー 値 mm	ロート流下時間 (s)		
				T11	T14	T17
N50	0	2150	175	12.6	6.5	4.1
	30	2190	145	15.3	8.9	5.6
	60	2220	152	16.1	9.6	6.2
	90	2130	153	19.0	10.4	6.9
	120	2170	142	21.6	12.8	8.9
F35	0	2180	215	19.2	12.1	7.1
	30	2220	207	21.5	12.3	7.9
	60	2210	187	27.2	15.4	9.9
	90	2220	182	31.9	18.4	11.9
	120	2220	169	37.1	20.7	14.4
P35	0	2020	214	18.6	11.3	7.2
	30	2030	211	22.5	12.9	8.6
	60	2050	186	27.3	15.4	10.2
	90	2090	176	34.7	19.1	12.0
	120	2110	168	43.8	23.5	14.3

註) Tn : Jnロートを流下した時間。

3.2 実験の構成

本研究では、以下に示す実験-1から実験-3を行った。いずれも試料の混練・攪拌にはオムニミキサ (容量5リットル) を用いた。水セメント比の違いから、N50の場合は60秒、F35およびP35の場合は180秒練りと、練りませ時間を変えた。

実験-1では、注水から120分までの試料の経時変化を30分ごとに測定した。

実験-2では、注水から30分後に再度、ミキサで攪拌した時のコンシステンシーの変化を測定した。このとき、攪拌時間をパラメータとすることから、攪拌時間の中間がちょうど注水後30分となるようにした。たとえば、攪拌時間が10分であれば、注水後25分~35分の10分間の攪拌を行った後に試験をした事になり、試料のハンドリング時間を含めると、注水37分後前後で試験を行ったことになる。

通常の経時変化を調べる試験では、試験前に軽く試料を切り返してから試験に供するが、この切り返しが試料の流動性に及ぼす影響は無視できない。そこで、実験-3では、注水から30分後にロートに試料を充填し、その後所定の時間まで試験容器の中で静置させた後で流下試験を行った。この試験容器内で静置させることを、ここでは容器内静置と呼ぶこととし、通常の試験直前に切り返しを行う静置とは用語を分けて使う。

3.3 ロート試験器の特性

実験-1の測定結果を表-3に示す。また、J11およびJ17ロートで推定した塑性粘度 (η_{11} および η_{17} と略記する) と J14 ロートで推定した塑性粘度 (η_{14} と略記する) の関係を図-2に示す。 η_{14} に対

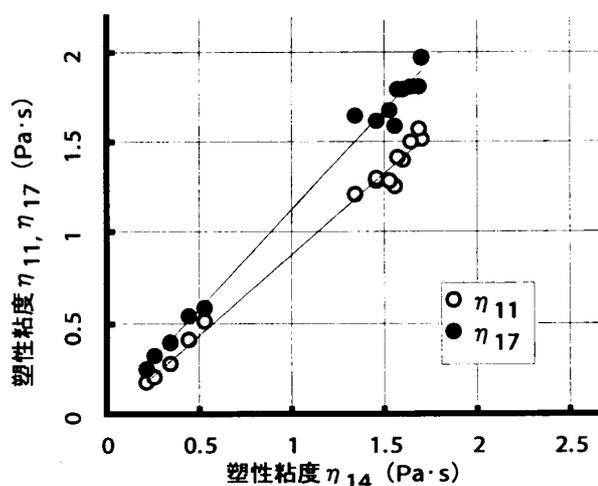


図-2 各ロートで推定される塑性粘度

して η_{11} の方が平均で0.88倍と小さくなっており、また反対に、 η_{14} に対して η_{17} の方がやや大きくなっている。すなわち、ロートの吐出口が大きいほど塑性粘度を大きく見積る傾向があることが分かる。いずれの塑性粘度が真の値であるかはここでは議論せず、3つのロートから得られた値の平均値を、本研究では塑性粘度 η と呼ぶこととする。

4. 静置や攪拌によるレオロジー性質の変化

4.1 レオロジー定数の経時変化

レオロジー定数(降伏値および塑性粘度)の経時変化を図-3および図-4にそれぞれ示す。図中には、最小2乗法で直線近似した結果も併記した。

降伏値の経時変化に着目すると、練上り時の0打モルタルフロー値(M_{90})がN50は175mmと小さいため、F35やP35に比べて降伏値が大きいところから変化が始まっている。いずれの降伏値も毎分0.5Pa程度、時間と共に増加傾向にある。F35とP35は特に直線性が顕著なのに対して、N50の降伏値にやや増減がみられるのは、練混ぜ時間が他の調査

よりも短かったためと考えられる。

塑性粘度の経時変化に着目すると、水セメント比の大きいN50の塑性粘度は他の調査の1/3程度であった。N50の塑性粘度は時間と共に小さくなる傾向を示しているが、高性能AE減水剤を用いたF35およびP35はほぼ一定あるいはやや増加する傾向を示した。高性能AE減水剤の分散効果のためではないかと考えられる。

4.2 再攪拌によるレオロジー定数の変化

実験-2では、練り上げたモルタルを30分後に再度攪拌した。試料は実験-1と同じ調査だが、実験を区別するために試料の名称の末尾にRを付け、N50Rなどのように表記した。表-4に実験-2の実験結果一覧を示す。また、図-5および図-6にレオロジー定数(降伏値および塑性粘度)と再攪拌時間の関係をそれぞれ示す。図中には、最小2乗法で直線近似した結果を併記した。

図-5に示す降伏値に着目すると、再攪拌によって降伏値はほぼ直線的に変化しており、たとえば、

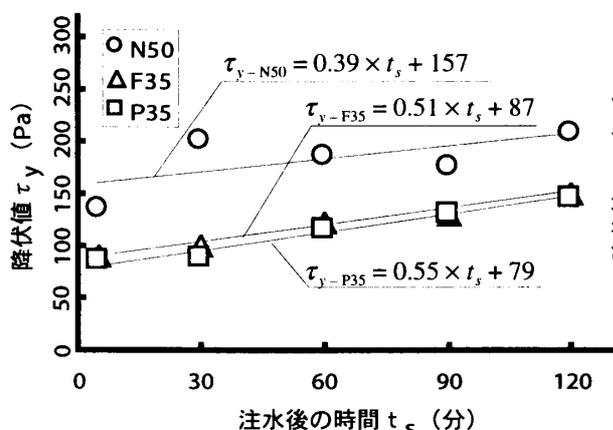


図-3 降伏値の経時変化 (実験-1)

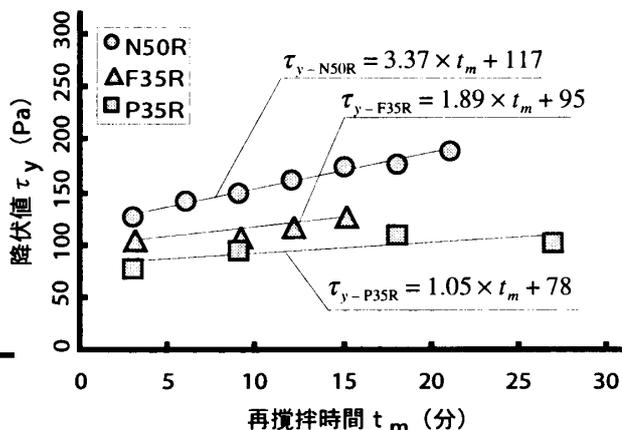


図-5 降伏値と再攪拌時間の関係 (実験-2)

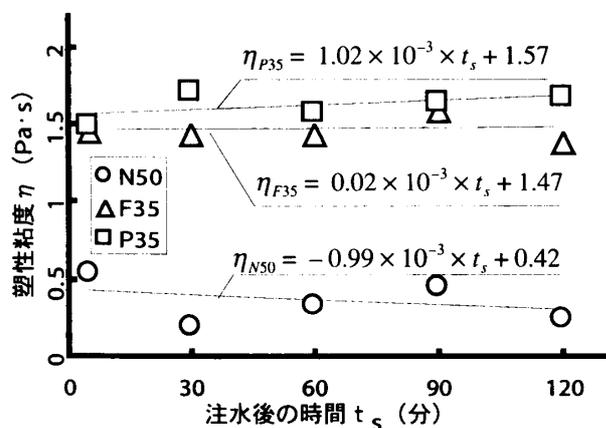


図-4 塑性粘度の経時変化 (実験-1)

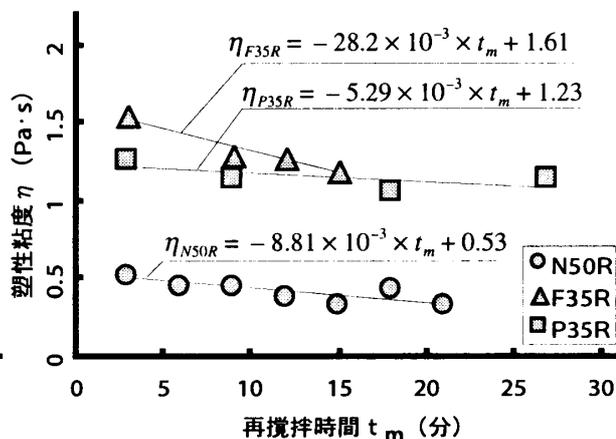


図-6 塑性粘度と再攪拌時間の関係 (実験-2)

表-4 再攪拌実験結果の一覧 (実験-2)

Series	再攪拌時間 分	単位容積質量 kg/m ³	0打モルタルフロ一値 mm	ロート流下時間 (s)		
				T ₁₁	T ₁₄	T ₁₇
N50R	3	2160	184	10.0	5.8	3.6
	6	2160	173	11.1	6.0	3.7
	9	2160	168	12.0	7.0	4.1
	12	2180	162	11.9	7.2	4.4
	15	2200	158	12.3	7.5	4.5
	18	2190	156	17.6	10.3	6.0
	21	2190	150	18.2	10.0	6.3
F35R	3	2080	196	23.4	13.5	8.9
	9	2110	196	20.6	11.7	7.4
	12	2130	187	22.5	13.4	8.1
	15	2090	178	25.3	13.1	8.4
P35R	3	2080	232	14.9	8.5	5.6
	9	2090	209	15.7	9.0	5.9
	18	2160	197	16.4	9.4	6.4
	27	2130	204	17.0	9.4	6.2

註) T_n : J_nロートを流下した時間.

N50Rは毎分3.4Paずつ増加している。

また、図-6に示す塑性粘度の変化に着目すると、実験-1に比べて攪拌時間の増大とともに塑性粘度が直線的に減少していくことが分かる。

図-5および図-6中のF35R(標準形)とP35R(遅延形)のレオロジー定数(降伏値および塑性粘度)に注目すると、標準形の高性能AE減水剤を使ったF35に比べ、遅延形の高性能AE減水剤を使ったP35の方がレオロジー定数の変化が小さいことが分かる。

N50の降伏値あるいは塑性粘度の1分間あたりの変化率を比較すると、経時変化よりも再攪拌時の方が約9倍大きい。これは、たとえば、静置して90分後に生じるレオロジー性質の変化は、再攪拌すれば10分で予測できる可能性があることを示して

表-5 再攪拌実験結果の一覧 (実験-3)

Series	容器内静置時間 分	ロート流下時間 (s)		
		T ₁₁	T ₁₄	T ₁₇
N50S	10	79.0	15.3	10.5
	12	86.8	10.4	7.3
	14	31.9	13.4	8.6
	15	44.3	17.8	9.3
	16	26.8	15.0	8.7
	17	90.3	27.5	44.2
	18	30.3	17.4	11.1
	20	25.3	13.9	8.1
F35S	10	66.4	28.3	17.2
	12	65.9	29.8	19.5
	14	48.6	37.8	25.8
	16	52.7	45.2	19.0
	18	87.2	46.0	73.2
	20	292	54.6	22.3
P35S	10	78.2	18.1	9.3
	12	23.1	13.3	9.1
	14	26.3	14.5	9.7
	16	29.6	14.0	9.6
P35S	18	28.6	16.4	10.4
	20	184	34.0	25.5
	24	151	60.7	13.5
	24	172	168.8	98.2

註) T_n : J_nロートを流下した時間.

いる。F35やP35は、塑性粘度の増減が実験-1と実験-2で違ったため、簡単には比較できないが、降伏値に限っていえば、F35は3.7倍、P35は1.9倍となり、遅延形の方が変化率の倍率が小さく、性状が安定していることが分かる。

4.3 容器内静置がみかけの塑性粘度に及ぼす影響

実験-3では、練り上げたモルタルを30分後にロートに充填し、所定の時間静置した後で流下試験を行った。試料は実験-1と同じ調合だが、実験

を区別するために試料の名称の末尾にSを付け、N50Sなどのように表記した。表-5に実験-3の実験結果の一覧を示す。容器内静置した試料の降伏値を測定できないため、図-3で求めた降伏値の近似式を用いて降伏値を推定した。近似式には30分+容器内静置時間分を代入し、流下試験時の降伏値を仮に求めて、みかけの塑性粘度の推定に用いた。

試料の流下挙動を目視観察したところ、容器内での静置時間がある一定以上となると、吐出口を解放してもなかなか流下が始まらず、一旦動き出すと徐々に加速をつけて流下していくようにみられた。試料に材料分離がみられないことから、チクソトロピー性が観察されたと考えられる。

図-7にみかけの塑性粘度と容器内静置時間の関係を示す。いずれも通常の静置試験(実験-1)と比べて塑性粘度は数倍のオーダーとなっている。チクソトロピー性が現れると、ひずみ速度の小さい領域での変形抵抗性が増大することから、試料全体が流下するまでの所要時間が長くなり、みかけの塑性粘度が増大すると考えられる。N50Sは、容器内静置時間が変化してもそれほどみかけの塑性粘度は変化しないが、高性能AE減水剤を用いたF35およびP35は特定の時間以後、急激にみかけの塑性粘度が増大している。また、標準形のF35の方が遅延形のP35よりも早期にみかけの塑性粘度の急激な増加がみられる。両者の調合的な違いは高性能AE減水剤だけなので、これは、試験容器中で静置されている間に、高性能AE減水剤の分散性能が部分的に低下したためと推測できる。また、遅延形の方が分散能力が強いため、やや遅れてみかけの塑性粘度が増大したものと考えられる。

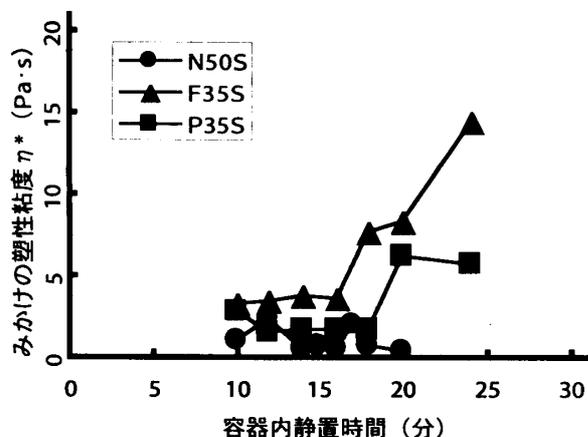


図-7 みかけの塑性粘度と容器内静置時間の関係(実験-3)

5. まとめ

本研究では、0打モルタルフロー試験およびロート流下試験を用いてモルタルのレオロジー定数の簡易推定手法を提案するとともに、静置や再攪拌がレオロジー性質に及ぼす影響について検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 本研究で提案する簡易推定手法によって、比較的軟練りのモルタルのレオロジー定数を推定できる。
- (2) 吐出口の小さいロートを流下する場合、吐出口が大きい場合に比べて、塑性粘度を小さめに見積もることになる。また、降伏値が大きくなるにつれてこの傾向は顕著になる。
- (3) モルタルのレオロジー性質の経時変化は、再攪拌によって予測できる可能性がある。
- (4) モルタルのチクソトロピー性は、容器内静置試験によって観察することができる。

今回の実験では、みかけの降伏値の増大を考慮せずに、みかけの塑性粘度だけで定性的な議論にとどめたが、ロートを流下する試料の変位を測定し、ロート内部のひずみ速度分布などを調べることにより、今後さらにチクソトロピー性について定量的に考察を進めたい。

【謝辞】 本研究費の一部は、平成11年度文部省科学研究費補助金・基盤研究(B)、平成11年度中部大学特別研究費によった。また、本研究では、伊野隆弘君、川村高央君、小長井鉄平君(中部大学)の助力を得た。付記して謝意を表す。

引用文献

- 1) 黒岩ほか: 高強度コンクリートのポンプ圧送による品質変化予測に関する実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), A-1, pp.753-754, 1997.9.
- 2) 小村ほか: フレッシュコンクリートのスランピング挙動に関するレオロジー的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第462号, pp.1-10, 1994.8.
- 3) 谷川ほか: 粘塑性流体のロート試験に関するレオロジー的考察, 日本建築学会東海支部研究報告, No.31, pp.9-12, 1993.2.