

論文 フレッシュモルタルの流動性の経時変化モデルに関する一考察

渡辺 健治^{*1}・小野 博宣^{*2}・新家 一秀^{*3}

要旨：本研究では、経時変化するフレッシュモルタルのレオロジー性質に着目し、この変化モデルを提案した。提案モデルでは、塑性粘度の逆数が指数関数的に減少することにより、時間経過とともに塑性粘度が増加する挙動を表現する。また、一定速度で低下する仮想のひずみ速度を媒介変数として定義することにより、練上り後にスランプアップしてからスランプダウンするという降伏値の増減を表現した。フレッシュモルタルを用いた実験を行い、レオロジー性質の経時変化を測定することにより、提案モデルの妥当性を検証した。

キーワード：フレッシュモルタル、レオロジー、経時変化、コンシステンシー座標

1. はじめに

レディーミクストコンクリート工場で練り上がったコンクリートは、アジテータトラックで現場まで運搬され、現場荷下し地点でスランプ試験などフレッシュ試験を行うのが普通である。練り上がった直後の出荷地点のスランプに比べて、現場到着時のスランプは若干小さくなる場合が多いため、練上り時は、輸送中のスランプロスを見込んで、ややスランプを大きめで出荷する場合がある。ところが、化学混和剤の発展により、遅延形のAE減水剤などは、練上りからしばらく経ってから分散性能が発揮されるため、単純にスランプロスするとは限らない。

近年、フレッシュコンクリートの物性を、スランプ値のみではなく、レオロジー的な考え方を取り入れ、降伏値と粘性項の2値で表現する研究報告が増えてきた。しかしながら、フレッシュコンクリートの物性は時刻とともに変化するにもかかわらず、この2つのレオロジー定数は時間変化しないと仮定した理論解析あるいは実験結果がみられる。たとえば回転粘度計¹⁾のようなツーポイントテストは、一般に安定したせん断流れ状態を維持するために試験時間が長くなり、試験初期と終盤の試料の同一性が問題となる。

本一連の研究では、フレッシュコンクリート

のレオロジー性質が時間や養生条件などによってどのように変化するかを報告してきた^{2),3)}。本報では、レオロジー性質の経時変化をコンシステンシー座標上で検討し、コンシステンシー曲線の移動パターンを数式化することにより、定量的にレオロジー性質の変化を考察した結果を報告する。

2. 実験の概要

2.1 実験の構成

実験はモルタルを試料とした2つの実験（それぞれMシリーズおよびNシリーズと略す）を行った。Mシリーズは、筆者らの既往の実験³⁾で、既に報告したもので、本報で再検討する。

2.2 使用材料と調合

それぞれの実験で用いた材料および調合を表-1および表-2に示す。セメントはいずれも普通ポルトランドセメントを用いた。MシリーズではJIS標準砂のみを用いたが、Nシリーズでは細骨材の粒度分布の違いが全体系の粘性にも影響を与える事を期待してS2とS3の混合比率を変化させた。練上り直後の0打モルタルフロー値が210mm（管理幅±10mm）となるように高性能AE減水剤の添加量を調節した。

2.3 試験方法

試料のレオロジー性質（降伏値および塑性粘度）は、0打モルタルフロー試験および漏斗流下

*1 中部大学 工学部建築学科助教授 工博 (正会員)

*2 中部大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

*3 中部大学大学院 工学研究科建設工学専攻

試験で簡易に測定した。降伏値を推定するために用いた0打モルタルフロー試験とは、JIS R 5201で用いられるモルタルフロー試験と同様の手順だが、15回の落下を行わず、コーンを引き上げた時に、自重で崩れた試料の拡がり直径（0打モルタルフロー値）を測定する方法である。漏斗流下試験では、J漏斗の吐出口が14mmとなるように切断したJ14漏斗（JSCE-F541）を用い、2回の流下試験の時間差が1秒以内であることを確認し、その平均値を流下時間とした。試

表-1 使用材料

記号	名称	密度 (表乾) kg/m ³	最大 粒径 mm
C	普通ポルトランドセメント	3150	—
S1	JIS標準砂	2640	2.0
S2	瀬戸産珪砂	2600	0.6
S3	瀬戸産珪砂	2620	0.2
Ad	高性能AE減水剤 ポリカルボン酸系	—	—

験およびJ14漏斗試験を用いたレオロジー定数の簡易推定手法の詳細については既往の研究を参照されたい^{3),4)}。

モルタルを試料としたシリーズでは、ホバートミキサーを用い、Mシリーズでは容量20リットル（パドルの回転速度330rpm、遊星運動77rpm）のものを、また、Nシリーズではセメントの物理試験方法（JIS R 5201）に準拠したモルタルミキサ（パドルの回転速度285rpm、遊星運動125rpm）を用いた。練混ぜ時間は、3分（Mシリーズ）あるいは6分（Nシリーズ）とした。

練上り直後を含め、注水時刻から30分毎に最長90分まで経時変化を測定した。

3. 塑性粘度の変化モデルの提案

3.1 塑性粘度の経時変化

図-1に、塑性粘度の経時変化の一例を示す。同図はMシリーズの塑性粘度の経時変化を示したものであるが、注水からの時間が経過すると塑性粘度が増加する傾向がみられる。ただし、時間に対して単調に線形増加するのではなく、緩やかなカーブを描いていると考えられる。

表-2 調合計画

Series	type	W/C	S/C	s/m	s ₂ /s	Air	Unit weight kg/m ³					Ad
		%		%	%	%	W	C	S			%C
									S1	S2	S3	
M	M3011	30	1.10	39.5	—	2	284	948	1042	—	—	1.0
	M3012	30	1.20	41.6	—	2	274	914	1097	—	—	0.9
	M3013	30	1.30	43.5	—	2	265	883	1148	—	—	0.8
	M3512	35	1.20	39.7	—	2	306	873	1048	—	—	0.9
	M3513	35	1.30	41.6	—	2	296	845	1098	—	—	0.9
	M3514	35	1.40	43.4	—	2	286	818	1145	—	—	0.9
N	N3560	35	0.73	41.0	60	2	309	884	—	384	258	2.9
	N3570	35	0.73	41.0	70	2	309	884	—	448	193	2.2
	N3580	35	0.73	41.0	80	2	309	884	—	512	129	1.9
	N4060	40	0.78	41.0	60	2	329	822	—	384	258	1.1
	N4070	40	0.78	41.0	70	2	329	822	—	448	193	1.0
	N4080	40	0.78	41.0	80	2	329	822	—	512	129	0.9

[Notes] W:水, S: 細骨材, s/m:モルタルに対する骨材の容積比, s₂/s: 細骨材全体に対するS2の容積比, s/a:細骨材率, Air: 空気量, Ad:高性能AE減水剤の添加量。

3.2 塑性粘度の経時変化モデル

一例としてM3012の塑性粘度および塑性粘度の逆数と時間の関係を図-2に示す。塑性粘度は、コンシステンシー曲線の傾きの逆数であり、コンシステンシー曲線は左上がりの曲線である以上、塑性粘度の逆数は、負の値を取り得ない。したがって、塑性粘度の経時変化モデルとしては、負の値をとらないような関数が望ましい。そこで、図-2(b)のように、塑性粘度の逆数を縦軸にとり、式(1)および式(2)のように、塑性粘度の逆数が指数的に経時変化するものと仮定した。図-2(b)中には、実測値を用いて最少二乗法で実験定数を算出した推定結果を併記した。同様に、推定した実験定数を用いて塑性粘度を推定した結果を図-2(a)中に併記した。

$$\frac{1}{\eta} = e^{h_1 t + h_2} \quad (1)$$

$$r = \sqrt{t} \quad (2)$$

ここで、 η ：塑性粘度 (Pa・s)、 e ：自然対数、 t ：注水からの時間(s)、 h_i ：実験定数。

図-2によれば、式(1)は、緩やかに曲率を変化させる塑性粘度の経時変化挙動を捕らえていると考えることができる。多少のバラツキはあるが、実験の精度や数式の単純さを考慮すると、実用には十分な推定精度であると考えられる。

3.3 塑性粘度の推定

式(1)を用いて、実測値と推定値を比較した結果を、図-3に示す。同図中には、MシリーズおよびNシリーズ全ての経時変化データを掲載した。したがって、1調合あたり、練上り直後から90分

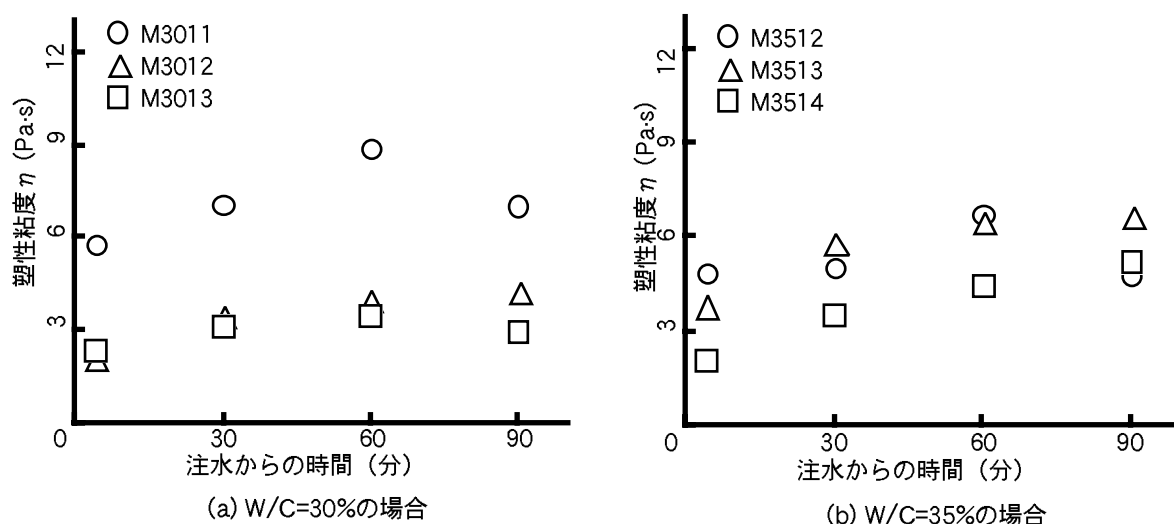


図-1 塑性粘度の経時変化の一例 (Mシリーズ)

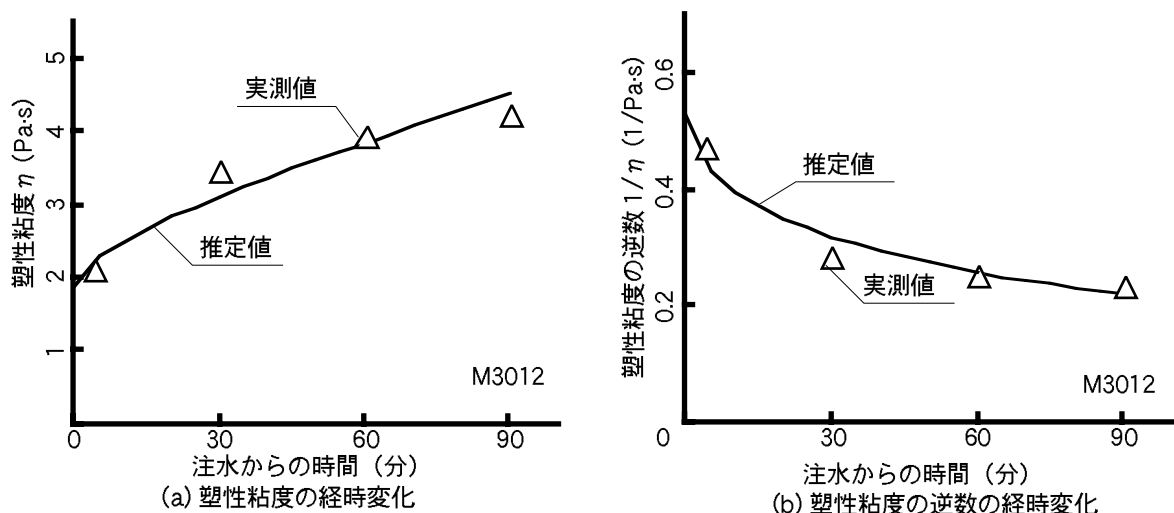


図-2 塑性粘度およびその逆数の経時変化の一例 (M3012)

後の4点づつがプロットされている。また、表-3に最少二乗法で算出した実験定数の一覧を示す。図-3によれば、塑性粘度が大きくなるとやや推定精度が落ちるものの、本研究で提案する実験式(1)は、よく塑性粘度の経時変化を追従していると考ええる事ができる。

4. コンシステンシー曲線の経時変化モデル

4.1 降伏値の経時変化

降伏値の経時変化の一例を図-4に示す。試料の練上りの0打モルタルフロー値を一定(210mm±10mm)に管理しているため、練上り時の試料の降伏値は100Pa程度の一定となっている。たとえば、図-4(a)に注目すると、○印で示したM3011調合の場合、注水から30分程度は降伏値は変化しないが、それ以後は徐々に降伏値が増加している。また、□印で示したM3013

調合では、時間経過とともに降伏値が増加するのに対し、△印で示したM3012調合は、30分頃に一旦降伏値が減少してから増加に転じるという、3つの調合は、S/Cを変化させ、それに応じて高性能AE減水剤の添加量を加減しただけであるが、異なる挙動を示している。前述の塑性粘度は、いずれの調合でも増加するだけの簡単な挙動であったが、降伏値は経時変化挙動だけに着目していても、整理が難しいことが分かる。

4.2 仮想のひずみ速度モデル

降伏値の複雑な変化を、できるだけ単純な理論で説明するために、本研究では以下のような仮説を考えた。まずはじめに、注水直後の仮の降伏値と塑性粘度は既知であると仮定する。さらにコンシステンシー座標上に、仮想のひずみ速度を考える。注水時刻を原点とすると、このひずみ速度は、 $t=0$ のときに、図-5中の $\dot{\gamma}_{t=0}$ という速度と

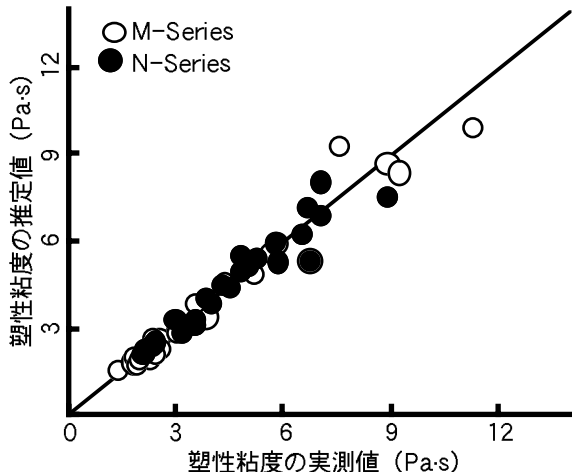
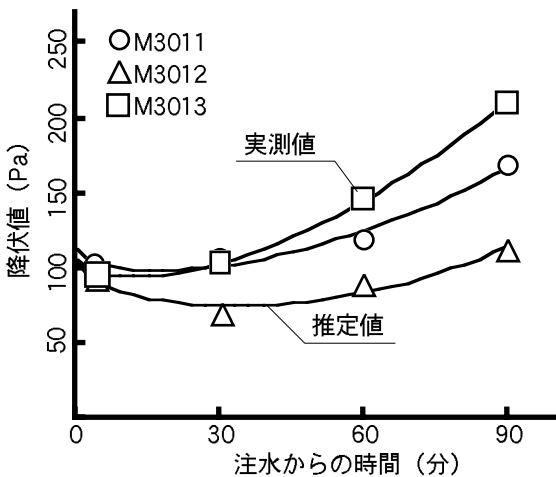


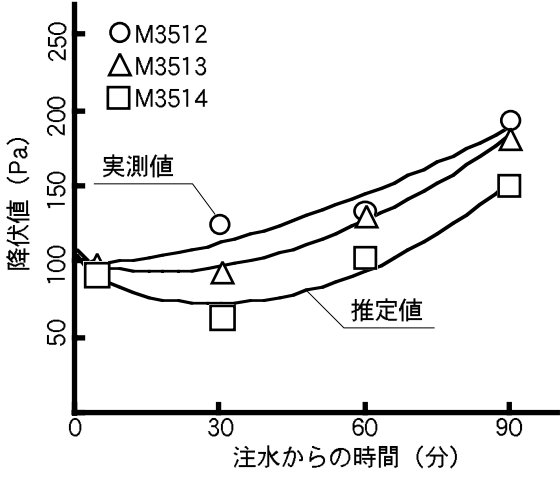
図-3 塑性粘度の推定値と実測値

表-3 実験式(1)中の実験定数

Series	h1 ×10 ³	h2	Series	h1 ×10 ³	h2
M3011	-5.00	-1.72	N3560	-8.00	-0.491
M3012	-12.1	-0.628	N3570	-10.5	-0.218
M3013	-4.66	-0.858	N3580	-3.48	-0.488
M3512	-1.96	-1.57	N4060	3.17	-2.37
M3513	-9.84	-1.25	N4070	-15.7	-0.571
M3514	-16.2	-0.507	N4080	-17.3	-0.317



(a) W/C=30%の場合



(b) W/C=35%の場合

図-4 降伏値の経時変化の一例 (Mシリーズ)

し、等速度で、小さくなる性質があるものとした。時刻 t_1 のとき、仮想のひずみ速度は、 $\dot{\gamma}_{t=t_1}$ にまで低下する。C1というコンシステンシー曲線で表わされる試料の物性は、C1と仮想のひずみ速度の交点を通る曲線へと変化するものと仮定した。ここで、図-5中のC2は、C1と仮想のひずみ速度との交点を通る曲線である。ここで、塑性粘度は、式(1)に示すように時間経過とともに増加しているため、C1とX軸の交点にある降伏値はやや小さくなり、C2とX軸との交点へと移動する。これが、練上り初期に降伏値が減少する現象（スランプアップ）を表現したものである。さらに時間が経過すると、仮想のひずみ速度は、負の値となる。仮想のひずみ速度が $\dot{\gamma}_{t=t_1}$ となったとき、C2という曲線で表わされる試料の物性は、C2とこのひずみ速度の交点を通るC3という曲線に変化することになる。塑性粘度は、式(1)で示すように、増加を続けることから、今度は、C3とX軸との交点である降伏値は増加することとなり、スランプダウンの挙動を示す事になる。

なお、仮想のひずみ速度は、流動性の低下の度合いを示す尺度であり、現実のひずみ速度とは異なる指数である。

数値シミュレーションでは、注水直後の仮の降伏値、仮想のひずみ速度の初期値および仮想のひずみ速度の低下速度という3つの未知数を初期値とし、式(1)のように塑性粘度が増加し仮想のひずみ速度が等速度で低下するというモデルで、ステップ毎のレオロジーレオロジー性質の経時変化を計算した。

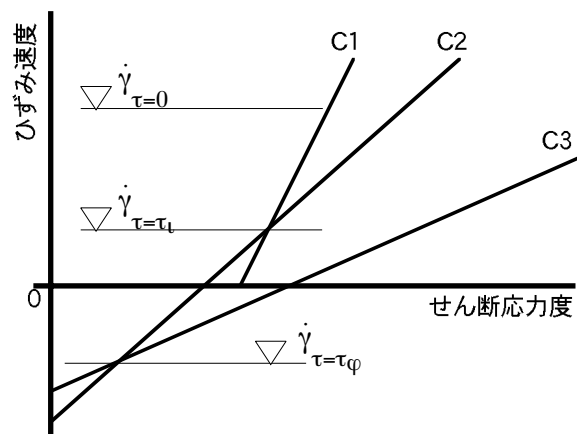


図-5 コンシステンシーの経時変化の概念

4.3 降伏値の推定

仮想のひずみ速度が一定速度で低下すると仮定し、コンピュータを用いて実験結果を数値解析した結果を図-4中の曲線で示す。数値解析では、仮想のひずみ速度が低下する時間刻み幅を60秒として計算した。図-4によれば、一旦降伏値が小さくなってから大きくなるという挙動を、シミュレーション結果はよく表現しているといえる。

シミュレーションを繰り返し、実験結果と最も類似したときの入力値を表-4に示す。表-4によれば、練上りの降伏値はいずれも100Pa前後であるのに対し、注水直後から降伏値は時間変化すると仮定しているため、時刻0の降伏値は最大で130Pa前後と大きいものもある。また、図-5で示した仮想のひずみ速度は、最大で80/s程度の大きい値であるが、1例だけは、仮想のひずみ速度が負の値から始まり、逆に増加するという現象がみられた。この原因については、今後の検討課題としたい。シミュレーションにより推定した降伏値と実測した降伏値の関係を図-6に示す。同図に

表-4 シミュレーションの入力値

Series	τ_{y0} (Pa)	C_{p0} (1/s)	$\Delta \gamma$ ($\times 10^{-3}/s^2$)
M3011	113	26.4	22.7
M3012	104	38.5	17.9
M3013	106	71.6	85.9
M3512	101	25.0	71.6
M3513	108	20.6	18.1
M3514	105	36.4	19.7
N3560	112	-32.9	-7.02
N3570	128	51.3	14.1
N3580	107	33.3	8.63
N4060	115	76.9	32.4
N4070	103	67.5	46.8
N4080	96.4	3.41	9.24

[Notes] τ_{y0} :時刻0における降伏値, C_{p0} :時刻0における仮想のひずみ速度, $\Delta \gamma$:仮想のひずみ速度の低下速度。

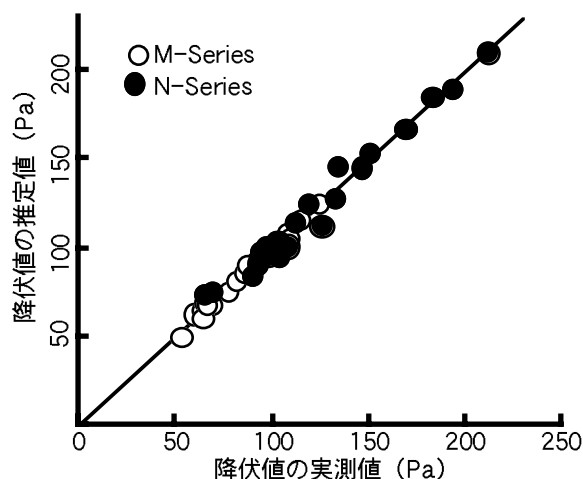


図-6 降伏値の実測値と推定値

よれば、シミュレーションによる推定は、実測値をよく表現しているといえる。この降伏値の推定には、式(1)より算出した塑性粘度を採用しているが、塑性粘度にばらつきがあったにもかかわらず、比較的安定して推定できていると考えられる。これは、降伏値を推定する0打モルタルフロー試験が、比較的外乱の影響を受けにくい試験であるのに対し、塑性粘度を測定する漏斗流下試験は、壁面による拘束や層流の仮定⁴⁾など、外乱や仮定と現実の違いが測定値に影響を与えやすい試験であることが一因であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、練上り直後から時間経過とともに変化するフレッシュモルタルのレオロジー性質に注目し、レオロジー性質の変化モデルを提案するとともに、実験を行って、その妥当性について検討した。本研究で得られた知見は以下のようにまとめることができる。

- 1) 塑性粘度の経時変化は、その逆数が指数関数的に増加するという数式で表現することができる。ただし、時間は平方根として入力する必要がある。
- 2) コンシステンシー座標上に仮想のひずみ速

度を定義し、そのひずみ速度とコンシステンシー曲線の交点を中心に塑性粘度が増加していくと仮定する。

- 3) 仮想のひずみ速度は一定速度で低下するため、コンシステンシー曲線との交点は常に変化する。そのため、降伏値の増減（スランプアップとダウン）を表現することができる。

コンクリートのレオロジー性質が時間経過や圧力、温度条件などによって変化するということを各種解析手法に導入することにより、たとえば、コンクリート打設のシミュレーションにおいて、ワーカビリティが時間経過とともに変化する状況等をシミュレートすることが可能になると考えられる。

謝辞

本研究は、禰宜田章志氏（トーヨーマテラン株式会社）、大津武君（中部大学大学院）、西田加奈恵君、甲斐博明君（いずれも中部大学）の助力を得た。付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 村田二郎：まだ固まらないコンクリートのレオロジーに関する基礎的研究，コンクリート工学, Vol.15, No.1, pp.25-34, 1977
- 2) 渡辺健治，小野博宣，谷川恭雄：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，コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.2, pp.427-432, 2000
- 3) 渡辺健治，小野博宣：フレッシュモルタルのレオロジー性質に及ぼす骨材相の影響，コンクリート工学年次論文梗概集, Vol.24, No.1, pp.837-842, 2002
- 4) 谷川恭雄，森博嗣，黒川善幸，小村理恵：粘塑性流体の漏斗試験に関するレオロジー的考察，日本建築学会 東海支部 研究報告集, No.31, pp.9-12, 1993