

論文 試料の変形状態が回転粘度計の測定結果に及ぼす影響に関する基礎的実験

三島 直生^{*1}・畑中 重光^{*2}・大村 修太郎^{*3}

要旨：本報では、試作した二重円筒式回転粘度計を用いて、フレッシュモルタルおよびフレッシュセメントペーストのレオロジー性質の定量化を試みた。まず、一般にあまり考慮されていない内円筒底面の影響に関して均質粘性体を用いた評価を行い、理論式でほぼ正確に評価できることを確認した。続いて、内円筒表面における試料のすべりに着目し、コンシステンシー曲線および試料内部の変形状態にどのような変化が現れるのかを確認した。その結果、一般に用いられる金属製内円筒では、表面で試料がすべることにより正確なレオロジー性質の評価が行えない場合があることが明らかとなった。

キーワード：レオロジー，回転粘度計，フレッシュモルタル，可視化，ダイラタンシー

1. はじめに

(1) 施工技術の体系化の必要性

近年の、鉄筋コンクリート構造物の構造設計技術および使用材料の多様化・高度化に対して、施工技術に関しては立ち後れている感が否めない。これまでのコンクリート工事は、施工条件に適したフレッシュコンクリートの流動性の決定や経時変化の考慮、振動締め固めの方法やその程度など、長年の経験に基づいて決定された、いわば「確実な経験則」で行われてきた。しかし、経験則は職人個々の曖昧な感覚に依存する部分が多く、その精度には個人差があるため、再現性や製品の品質の安定性に関して正確な評価は不可能である。また、前述したような設計技術および材料の革新により、経験則が及ばない場合には、広範囲な条件で体系化などがされていない経験則では応用が難しく、実施工時に困難が伴うことも予想される。

このような問題に対して、最も効率的かつ効果的な対策は、これまでに蓄積され、継承されている「経験則」に関する情報の集約と、それに基づく施工技術の体系化であると考えられる。

これまでも、企業や業界の内部では技術資

料の刊行などのかたちでこのような試みは行われてきているものと思われるが、「経験則」の十分な共有には至っていない。この原因としては、最も基本となるフレッシュコンクリートの流動性状が解明されるに至っておらず、職人個々の感覚を定量化するための共通の尺度が無いと考えられる。

(2) レオロジーを導入した研究の問題点

既に、研究室レベルの研究としては、フレッシュコンクリートの流動性の評価方法として、レオロジーを導入した研究が比較的多く報告されている¹⁾。前述の共通の尺度となり得るのは、現時点ではレオロジー定数が最も有望である。

しかし、各研究における測定値はまちまちで、レオロジー定数として確定的な値が示されるには至っていない。これには大きく分けて以下のような問題があると考えられる。

- a) レオロジーモデルとしてビンガムモデルを仮定している
- b) レオロジー試験装置の測定結果のみを評価の対象としている

いずれも、数値解析や理論解析が先行して研究が進んできたフレッシュコンクリートの分野

*1 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻助教 博士（工学）（正会員）

*2 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻教授 工博（正会員）

*3 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻大学院生

に特有な問題と考えられるが、a) に関しては測定対象が均質な粘塑性体とする仮定から出発しているために、例えば変形を与えるだけで流動性が変化する現実の高濃度サスペンションの挙動とはかけ離れた評価となることも少なくない。

また、b) に関しては、均質粘性体用に開発されたレオロジー試験装置をそのまま評価方法まで含めて流用しているために起こる問題で、本来レオロジー試験装置ごとに固有な測定条件が満たされていないければ、その測定結果は全く意味を成さないが、フレッシュコンクリートやフレッシュモルタルは試料内部の変形状態を評価すること自体が非常に困難な材料であるために、この測定条件の評価が行われること^{2),3)}はまれであり、結果として測定結果のみが使用される場合が多いのが現状である。

このような問題に関しては、高濃度サスペンションに特有な性質を考慮し、振動による流動化や経時変化、閉塞などといった実施工における様々なフレッシュコンクリートの挙動を表現できる、高精度かつ実用的なレオロジーモデルの構築および定量化が早急に行われる必要があり、同時に、その測定方法に関しても研究される必要がある。

(3) 本研究の目的

以上のような問題点を踏まえ、本研究では、コンクリート工事にに関する施工技術の体系化に資する基礎研究として、フレッシュコンクリートのレオロジー性質のモデル化およびその定量化を行うことを目的としている。

本報では、その基礎段階として、フレッシュコンクリートの分野でこれまでに最も多く用いられているレオロジー試験装置である二重円筒式回転粘度計を取り上げ、試料の変形状態と測定されるレオロジー性質の関係を把握し、回転粘度計による測定の問題点を明確にするとともに、正確なレオロジー性質の評価を試みる。

2. 内円筒底面の影響



＜モルタル用回転粘度計＞
形式：外円筒回転型
外円筒サイズ：φ100×130 (mm)
内円筒サイズ：φ50, 80×100 (mm)
測定回転数：1, 2, 6, 12, 18 (rpm)
出力：トルク、外円筒の回転角度
トルク計：容量 2N・m, 分解能 4.0
×10⁻⁴ N・m (ダイヤフラム型)
回転計：分解能 0.1°

写真-1 モルタル用回転粘度計

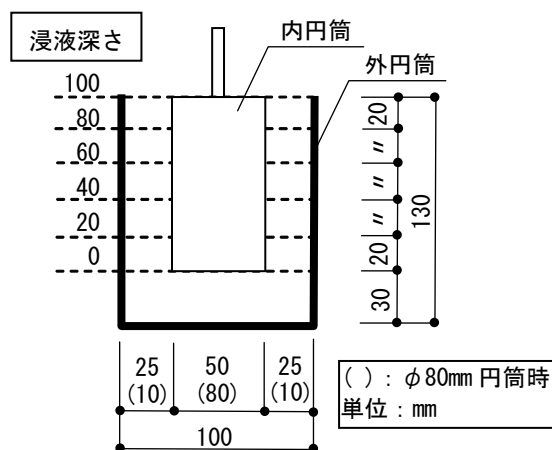


図-1 内円筒の浸液深さ

本章では、一般にあまり考慮されていない測定トルクに及ぼす内円筒底面の影響（以下、端面効果）に関して、均質粘性体を用いて検証を試みた。

2.1 実験概要

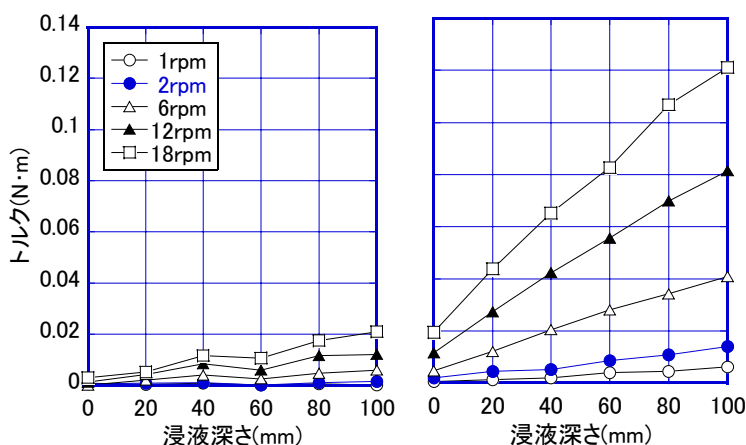
本実験では、写真-1 に示す試作したモルタル用回転粘度計を用いた。また、比較のために市販のB型回転粘度計も用いた。

測定用の均質粘性体としては、蜂蜜シロップを用いた。測定時の試料温度は19.0℃であった。

測定では、内円筒底面に発生する試料のトルクを推定するために、内円筒の浸漬深さを図-1に示すように変化させた時のトルクと回転速度の関係を計測した。内円筒はφ50, 80 (mm) の2種類を用いた。

2.2 実験結果とその考察

図-2 に、試料深さとトルクの関係の例を示す。両者の関係は、回転数毎に、浸液深さ0mm（内円筒底面が試料に接している状態）に至るまで良好な線形関係にある。



(a) 内円筒直径：50mm (b) 内円筒直径：80mm

図-2 内円筒の浸液深さとトルクの関係

図-3 には、通常の測定状態である浸液深さ 100mm の時のトルクに対する浸液深さ 0mm の時のトルクの比率と回転数の関係を示す。この比率は、回転粘度計の測定トルクにおける底面の影響割合を示すが、低回転数の $\phi 50\text{mm}$ においてトルク計の分解能の関係で誤差が発生し、大きな値となっている以外は、内円筒の直径、および回転数によらずおよそ 15~20%程度となっており、通常 13~23%程度とする過去の研究結果⁴⁾と一致している。

図-4 に、式(1)⁵⁾を用いて内円筒底面に発生するトルクを算定した理論値と実測値の関係を示す。

$$T = 2\pi R^3 \tau / 3 \quad (1)$$

ここに、 T : トルク (N·m), R : 内円筒半径 (mm),
 τ : セン断応力 (N/mm²)

ただし、せん断応力 τ は、同一試料を用いて B 型回転粘度計で得られたコンシステンシー曲線から求めた。これは、試料が均質粘性体であり、B 型回転粘度計で測定された値が真値であると判断されるからである。また、このときのせん断ひずみ速度は内円筒側面のせん断ひずみ速度から計算している。

図によれば、内円筒回転数の小さい範囲においては、実測値と理論値は比較的良く一致しており、理論式の妥当性が確認された。また、高

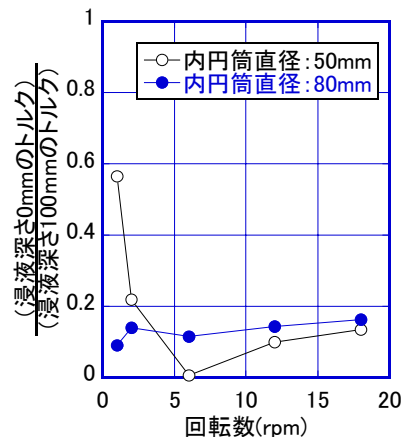


図-3 内円筒の浸液深さ 0mm と 100mm の比と回転数の関係

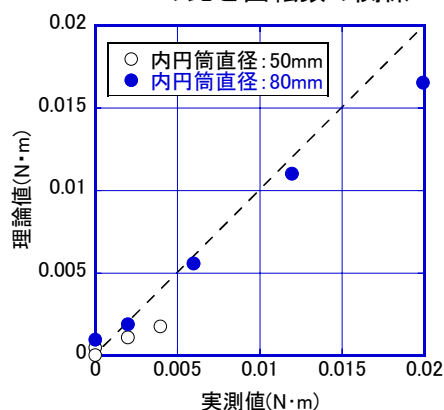


図-4 内円筒底面に発生するトルクの理論値と実測値の関係

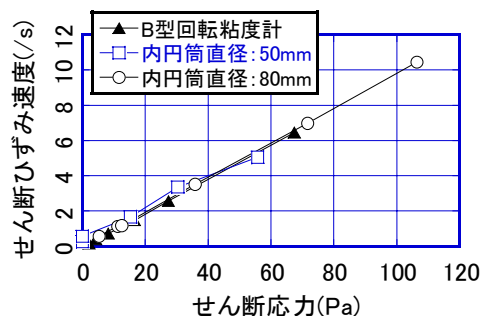


図-5 蜂蜜シロップのコンシステンシー曲線

回転数において実測値の方が大きくなる傾向があるが、これは内円筒のエッジ効果⁴⁾によるものと考えられる。

フレッシュモルタルなどの高濃度サスペンションの端面効果は現時点では不明であるが、以下の考察では、便宜上、式(1)の補正項を使用してせん断応力の算定を行うこととする。

図-5 に、蜂蜜シロップで測定したコンシステンシー曲線を示す。B 型回転粘度計の測定結果との比較からは、本実験で用いるモルタル用回

転粘度計によって正確にコンシステンシー曲線が測定されていることが分かる。

3. 試料の変形状態がコンシステンシー曲線に及ぼす影響

回転粘度計によるフレッシュモルタルやフレッシュセメントペーストの測定時に、最も問題となるのが内円筒表面におけるすべりである。本章では、内円筒表面のすべりの状態を変化させて、コンシステンシー曲線および試料内部の変形状態にどのような変化が現れるかを確認することを試みた。

3.1 実験概要

試験装置は2章と同様とし、内円筒を通常の金属製ロータおよび試料との付着を改善する目的で作成した硬化モルタル製ロータ（W/C=65%，細骨材容積比 $s/m=0.55$ ，気中養生，材齢2ヶ月，水中浸漬1min間の単位表面積あたりの吸水量： $0.015\text{g}/\text{cm}^2$ ）の2種類を用いた。内円筒サイズは $\phi 50 \times 100(\text{mm})$ のみとし、モルタル製ロータは、表層部の吸水能力が変化する恐れがあるため、使用は1回限りとした。

表-1に用いた試料の調合を、図-6に測定方法の概要を示す。外円筒となるプラスチック製の $\phi 100 \times 130\text{mm}$ の型枠を仕切り版で区切り、2色に色分けした試料を半量ずつ充填〔図(a)参照〕し、仕切版を撤去後に型枠ごと回転粘度計の回転台に固定し、内円筒を挿入〔図(b)参照〕してコンシステンシー曲線の測定を行った。測定後はそのまま硬化させ、材齢7日で型枠を脱型し、図(c)のように切断して断面の変形状態を観察した。ただし、内円筒の下部に関しては、内円筒挿入時に着色試料の境界が乱されているため、変形状態は考察の対象外とする。

試料の着色には、フタロシアニンを主成分とする粉末の青色着色剤を $0.5\text{g}/\text{L}$ 添加した。

コンシステンシー曲線の測定時には、それぞれせん断ひずみ速度を $1.7 \rightarrow 3.3 \rightarrow 0.6 \rightarrow 5.0 \rightarrow 0.3 \rightarrow 0.0$ ($1/\text{s}$)の順に連続して6水準に変化させ、各せん断ひずみ速度において1回転(360°)ず

表-1 調合表

種類	W/C	単位量(g/L)			SP/C (%)	FL ₀
		W	C	S		
セメントペースト	0.33	510	1544	—	0.12	200
モルタル	0.38	272	717	1275	0.37	200

[注]SP/C：高性能 AE 減水剤添加率、FL₀：0 打フロー値

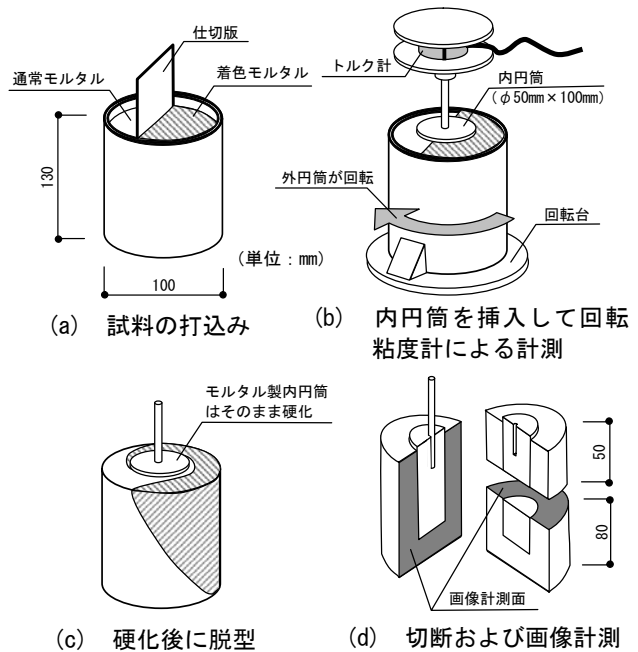


図-6 測定方法の概要

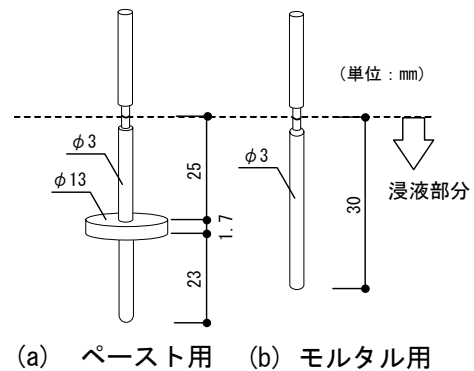


図-7 B型回転粘度計のロータ形状

つ変形を与えた。コンシステンシー曲線を作成する際には、各せん断ひずみ速度時に計測されたせん断応力を平均した値を用いた。

モルタル用回転粘度計と同時に、B型回転粘度計による測定（コンシステンシー曲線のみ）も行った。図-7にB型回転粘度計で用いたロータの形状を示す。

3.2 実験結果とその考察

(1) コンシステンシー曲線

図-8に、試料が全断面で均等に変形したと仮

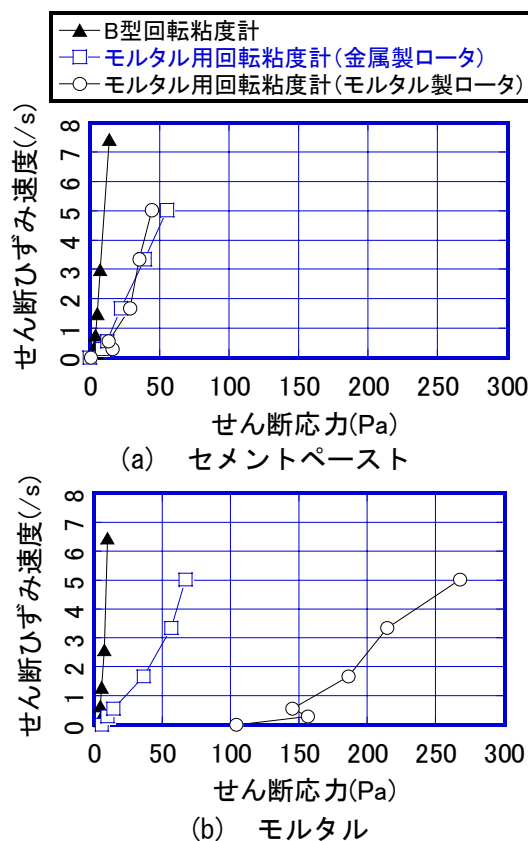


図-8 コンシステンシー曲線

定した場合のコンシステンシー曲線を示す。いずれの試料においても B 型回転粘度計のせん断応力が非常に小さい値となっている。また、モルタル用回転粘度計では、セメントペーストでは内円筒の種類によらず、ほぼ同一のコンシステンシー曲線が得られているのに対し、モルタルでは、金属製ロータのせん断応力がモルタル製ロータの場合と比べて非常に小さな値となっている。

図-9 には、試料断面の変形状態を示すが、着色試料の形状の比較から明らかなように、セメントペーストではロータの種類によらず類似な変形をしているのに対し、モルタルでは金属製ロータを用いた場合にほとんど試料が変形していないことが解る。この様な測定されるコンシステンシー曲線および試料の変形状態の差は、内円筒表面のすべりによるものと考えられる。金属製ロータにおいて、セメントペーストとモルタルですべりに差が出る理由は、試料のせん断抵抗とすべり抵抗の大小関係が異なっている

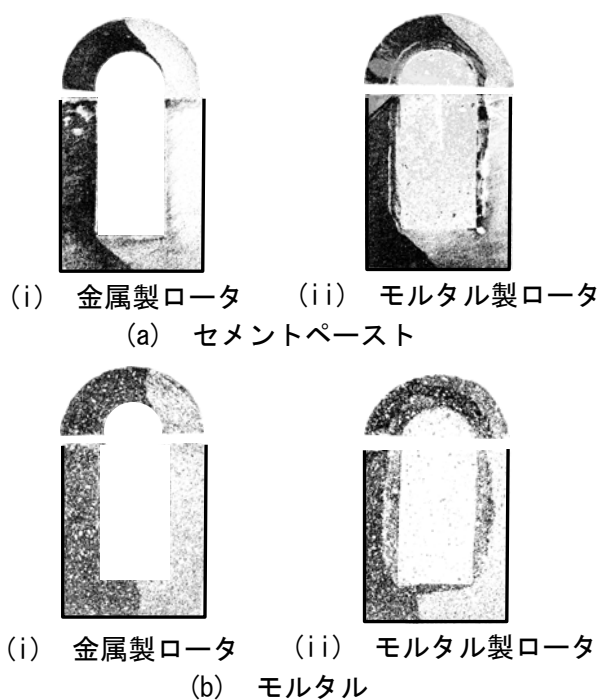


図-9 試料断面の変形状態

ためと考えられる。すなわち、セメントペーストではせん断抵抗に比べてすべり抵抗の方が大きいため試料が変形し、モルタルではすべり抵抗の方が小さいために試料が変形しなかったと考えられる。

通常、レオロジー試験を行う際には微振動を加えて試料容器に試料を充填するが、このときに、試料容器側面および金属製ロータ表面には余剰水が集まり⁶⁾、すべり層が形成され、すべり抵抗が低下する。これに対して、硬化モルタル製ロータでは、ロータの挿入時に表面の細孔が試料から余剰水を吸水することにより、ロータ表面に極薄い低 W/C の層を形成するため、ロータ表面にすべり層が形成されにくくなる。

以上より、このすべり層の影響により、一般に用いられる金属製のロータでは、試料の変形抵抗性を正確に評価できていない場合がある。また、B 型回転粘度計のようなロータの表面積が小さい場合には、さらに不利な状況となるため、測定時には注意が必要となる。

(2) せん断ひずみ依存性

図-10 に、モルタル製ロータを用いた場合のモルタルのせん断応力と時間の関係を示す。同図

には、比較のために蜂蜜シロップのせん断応力およびせん断ひずみ速度の時刻歴も示す。図によれば、せん断ひずみ速度が変化した瞬間に、せん断応力が一旦上昇した後、徐々に低下して一定値に収束していくものと、一旦小さな値を示して徐々に増加して一定値に収束する物がある。この違いは、せん断ひずみ速度が増加した直後か減少した直後かの違いである。このような特性は、図(b)に示す均質粘性体の蜂蜜シロップではみられないことから、高濃度サスペンションに特有なダイラタンシーの影響と考えられ、フレッシュコンクリートの流動性においては振動時の流動化や閉塞現象のメカニズムを説明するために不可欠な、極めて重要な性質である。しかし、このような特性は前節までに示したような従来型のコンシステンシー曲線では表現できず、レオロジー性質の表示方法としては不完全であるといえる。また、測定方法についても、通常の一定のせん断ひずみ速度で変形させるだけでは現れてこない性質であるため、測定方法の開発、レオロジーモデルの構築、およびその表現方法まで含めた検討が今後重要となると予想される。

4. まとめ

本報では、回転粘度計を用いたレオロジー性質の評価手法に関して実験的な検討を行った。

均質粘性体を用いた実験からは、内円筒底面の影響は理論式でほぼ正確に評価できることを確認した。

フレッシュセメントペーストおよびフレッシュモルタルの測定結果からは、一般に用いられる金属製内円筒では、表面で試料がすべることにより正確なレオロジー性質の評価が行えない場合があることが明らかとなった。

また、高濃度サスペンションのレオロジー性質に対しては、既存の測定手法および表現方法では十分な評価ができないことを示した。

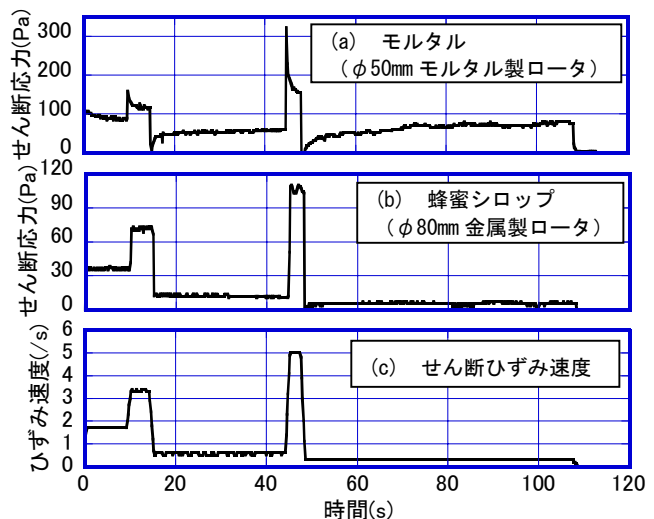


図-10 せん断応力およびせん断ひずみ速度の時刻歴

【謝辞】

本研究費の一部は、平成 18 年度科学研究費補助金・若手研究(B)（研究代表者：三島直生）によった、付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 谷川恭雄 ほか：フレッシュコンクリートの力学モデル研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，1996.4
- 2) 村田二郎，菊川浩治：まだ固まらないコンクリートのレオロジー定数測定方法に関する一提案，土木学会論文報告書，第284号，pp.117-126，1979.
- 3) 長滝重義，米倉亜州夫：回転粘度計によるモルタルの流動性解析の1考察，セメント技術年報 XXIX，pp.207-212，1975.
- 4) C.H.Lindsley and E.K.Fischer, End-Effect in Rotational Viscometers, J.Appl. Phys., Vol.18., 1974.11
- 5) 川崎種一：回転粘度計による粘性測定の実際<改訂>，東機産業株式会社，pp.3-4，2003.11
- 6) 犬飼利嗣，畑中重光，三島直生，金子林爾：視覚的評価方法に基づくモルタル中の自由水のブリーディング挙動に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No.590，pp.1-7，2005.4