

論文 回転粘度計を用いたフレッシュモルタルのダイラタンシー特性の定量化に関する研究

横山 達資*1・三島 直生*2・畑中 重光*3

要旨：本研究では、フレッシュモルタルのせん断ひずみ速度が急変した際に、ダイラタンシーに起因すると思われる、せん断応力が急激に増加もしくは減少する特性（オーバーシュート現象）について、この変化挙動を定量化する事を目的としている。実験の結果、水セメント比が小さいほど、また細骨材容積比が大きいほどダイラタンシー特性が強くなること、せん断応力のオーバーシュート後の収束値はせん断ひずみ速度の履歴の影響を受けずビンガムモデルでモデル化できること、動的な内部摩擦係数を求める事でフレッシュモルタルのせん断抵抗を評価できる可能性があることなどを示した。

キーワード：フレッシュモルタル, ダイラタンシー, 回転粘度計, 間隙水圧, 内部摩擦係数

1. はじめに

本研究では、これまでにフレッシュコンクリートのレオロジー性質の把握およびモデル化に向けて、回転粘度計を用いたフレッシュモルタルの測定結果から、ダイラタンシーに起因してせん断ひずみ速度が急変した際に、せん断応力が急激に増加もしくは減少する特性（以下、オーバーシュート現象）があることを示し、せん断ひずみ速度の変化分(以下、 $\Delta \dot{\gamma}$)とその際のせん断応力の変化分(以下、 $\Delta \tau$)の間に強い相関があることを示した¹⁾。また、既報^{2),3)}では様々なせん断ひずみ速度で $\Delta \tau - \Delta \dot{\gamma}$ 関係が成立する事を確認し、調合によってその関係が変化する事を示すと共に、経時変化が同関係に与える影響についても考察を加えた。さらに、同関係を以下の形で定式化できる事を示した。

$$\Delta \tau = A \{ \exp(B \Delta \dot{\gamma}) - 1 \} \quad (1)$$

ここに、 $\Delta \tau$ ：せん断応力の変化分 (Pa),

$\Delta \dot{\gamma}$ ：せん断ひずみ速度の変化分 (/s),

A, B：試料ごとに求まる係数

そこで本報では、水セメント比 W/C および細骨材容積比 s/m を要因として、これまでより広範囲な水準について、 $\Delta \tau - \Delta \dot{\gamma}$ 関係を測定し、各要因が与える影響を確認

する事を目的に実験を行った。

2. 実験の概要

2.1 試料および実験の要因と水準

回転粘度計で測定を行う際の $\dot{\gamma}$ の変化条件を表-1に示す。これまでの実験結果²⁾から、回転粘度計を反転させた際の $\Delta \tau$ の値は、 $\Delta \dot{\gamma}$ の大きさによらず一定となることが分かっているため、本実験では反転は行わず、同方向の加・減速のみとした。モルタルの調合は表-2に示す7種類とし、W/C および s/m をそれぞれ4および3水準に変化させた。細骨材は町屋川産の川砂を用いた。混和剤は市販のポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用し、フレッシュモルタルの流動性は、練上がり直後の0打モルタルフロー値が190となるように調節した。

2.2 実験方法

(1) 実験装置

試験装置には試作したモルタル用回転粘度計¹⁾を用い

表-1 $\dot{\gamma}$ の変化条

測定番号	せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ (/s)	測定番号	せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ (/s)
1	5.0→1.7→5.0	6	3.3→0.6→3.3
2	3.3→5.0→3.3	7	3.3→0.3→1.7
3	1.7→3.3→1.7	8	1.7→0.6→1.7
4	0.6→5.0→0.6	9	1.7→0.3→3.3
5	0.3→5.0→0.3	10	0.6→0.3→0.6

表-2 モルタルの調合表

記号	s/m	W/C	単体量(g/ℓ)			SP/C(%)	練上がり直後0打モルタルフロー値	1回目測定後0打モルタルフロー値	
			W	C	S				
A	0.5	0.55	317	576	1275	0.00	180	168	
B		0.5	306	612	1275	0.10	201	177	
C		0.4	279	697	1275	0.54	190	155	
D				243	810	1275	1.13	192	177
E	0.45	0.3		267	891	1148	0.93	195	115
F	0.4			292	972	1020	0.75	185	105

*1 三重大学大学院工学研究科・大学院生（正会員）

*2 三重大学大学院工学研究科・准教授・博士(工学)（正会員）

*3 三重大学大学院工学研究科・教授・工博（正会員）

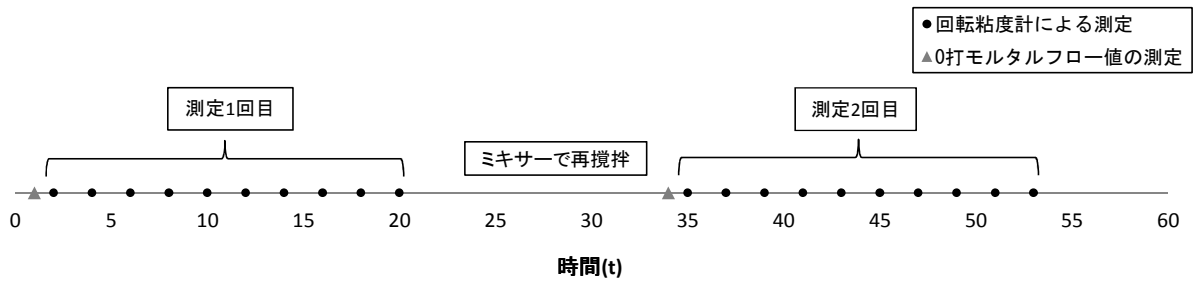


図-2 細骨材容積比 s/m の影響測定

た。測定装置の概要を図-1に示す。フレッシュモルタルを充填した型枠ごと回転粘度計の回転台に固定し、内円筒を挿入した後に所定の回転速度で外円筒を回転させ、内円筒に発生するトルクを測定した。内円筒および外円筒の試料と接する表面(底面は除く)には、試料との境界におけるすべりを防止する目的でリブを備えた。間隙水圧計のフィルタには#200(目開き 5 μ m)のステンレスメッシュを用い、フィルタ面が内円筒に固定されたリブの外側と一致するように内円筒に固定した [図-1 (b)参照]。測定時にはフィルタ内部に水道水を充填してフレッシュモルタルに挿入した。測定項目は内円筒に加わるトルク、外円筒の回転角、および間隙水圧とし、動ひずみ測定器によりサンプリング間隔を 5ms とし測定した。

(2) 測定手順

測定のタイムテーブルを図-2に示す。測定の手順は、まず練上り後に 0 打モルタルフロー値を計測し、No. 1→No. 10 の順番で回転粘度計による測定を行った(以下、1回目と称する)。その後、経時変化の影響を確認するために、試料容器から取り出し練鉢にて再攪拌した後に、再び試料容器に充填し、No. 1→No. 10 の順番で測定を行った(以下、2回目と称する)。

測定が継続すると、内円筒のリブ表面にせん断すべり面が形成される様子が確認されたため、No. 1~10 の各測定の間には、せん断滑り面を破壊するため、自作した小型振動機を試料に挿入し振動を与えた。図-3に、小型振動機の概要を示す。

3. 実験結果と考察

3.1 測定結果の時刻歴の例

図-4に本実験の測定結果の時刻歴の例を示す。同図から、本実験においても既報¹⁾と同様の傾向が見られ、 $\dot{\gamma}$ が一定の領域においても τ の値は大きく変化している。ここで、図中に示すように、本研究では $\dot{\gamma}$ の増加分を $\Delta\dot{\gamma}$ とし、 $\dot{\gamma}$ が増加した直後の τ のオーバーシュート量(定 $\dot{\gamma}$ 下における τ の収束値までの差分)を $\Delta\tau$ と定義する。フレッシュコンクリートの分野において、この様な応力のオーバーシュートは、セメントのチキソトロピーに起因した現象であると説明される^{例えば 4)}ことが多いが、

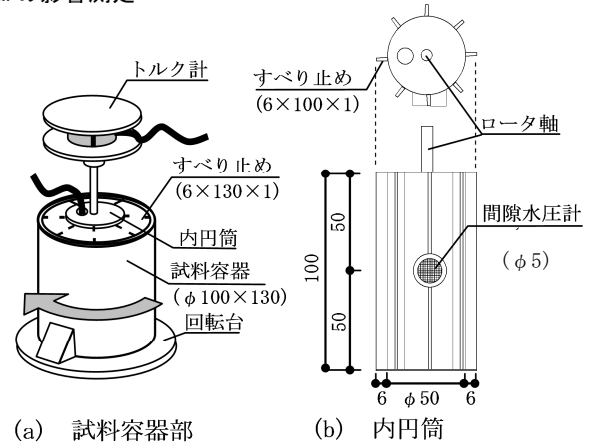


図-1 測定装置の概要 (単位: mm)

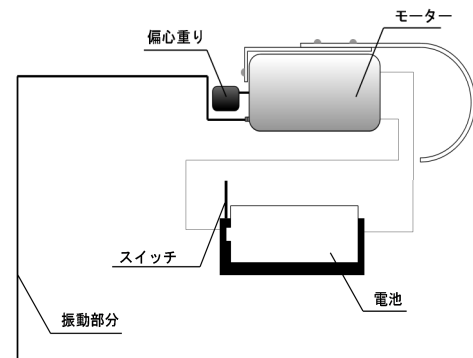


図-3 振動機の概要図

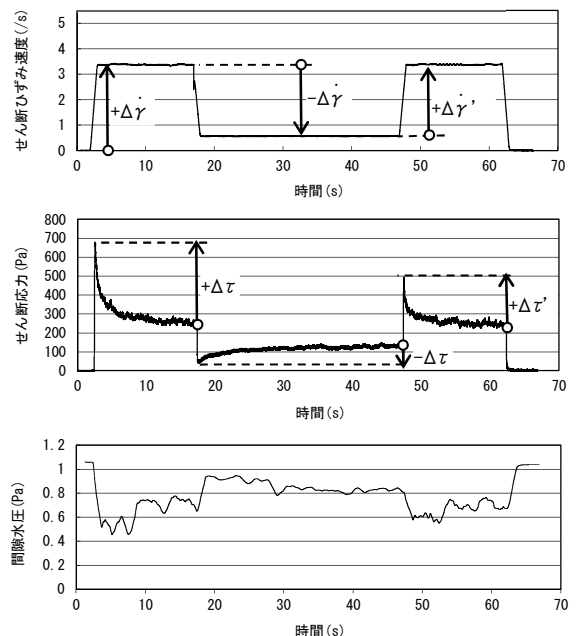


図-4 測定結果の例(調査 D No. 6)

図-4 下段に示した間隙水圧の測定結果によれば、バラツキはあるものの、 τ が増加した際に u は減少し、逆に u が減少した際には τ は増加している。これは、せん断応力のオーバーシュートの発生メカニズムとしては、ダイラタンシーによる部分が大きい事を示すと考えられる。

3.2 $\Delta\tau - \Delta\dot{\gamma}$ 関係

(1) 細骨材容積比 s/m

図-5 (a)に、細骨材容積比 s/m を変化させた場合の $\Delta\tau - \Delta\dot{\gamma}$ 関係の測定結果を示す。同図には、式(1)を用いた近似曲線も示してある。図によれば、 s/m が大きいほど $\Delta\tau - \Delta\dot{\gamma}$ 関係の勾配が大きくなり、また関係曲線の曲率も大きくなる傾向があり、これらの結果はダイラタンシー特性が強くなっている事を示していると考えられる。

これは s/m が大きいほど、試料がせん断変形した際に骨材の接触が起きやすくなるためであると考えられる。また、上段に示す1回目の測定結果と下段に示す2回目の測定結果の比較からは、2回目の測定結果の方が勾配が大きくなっている。これは、表-1中に示した1回目の測定後の0打モルタルフロー値の低下からも明らかなように、経時変化により流動性が低下したことに起因するものと考えられる。

(2) 水セメント比 W/C

図-5 (b)に、水セメント比 W/C を変化させた場合の $\Delta\tau - \Delta\dot{\gamma}$ 関係の測定結果を示す。ここで、 $W/C = 0.3$ の試料は図-5(a)で示した $s/m = 0.5$ の試料と同じ物であるが、比較のために再掲している。この図によると W/C が小さ

[注] 図中の A, B は式(1)の定数を、R は相関係数を示す。

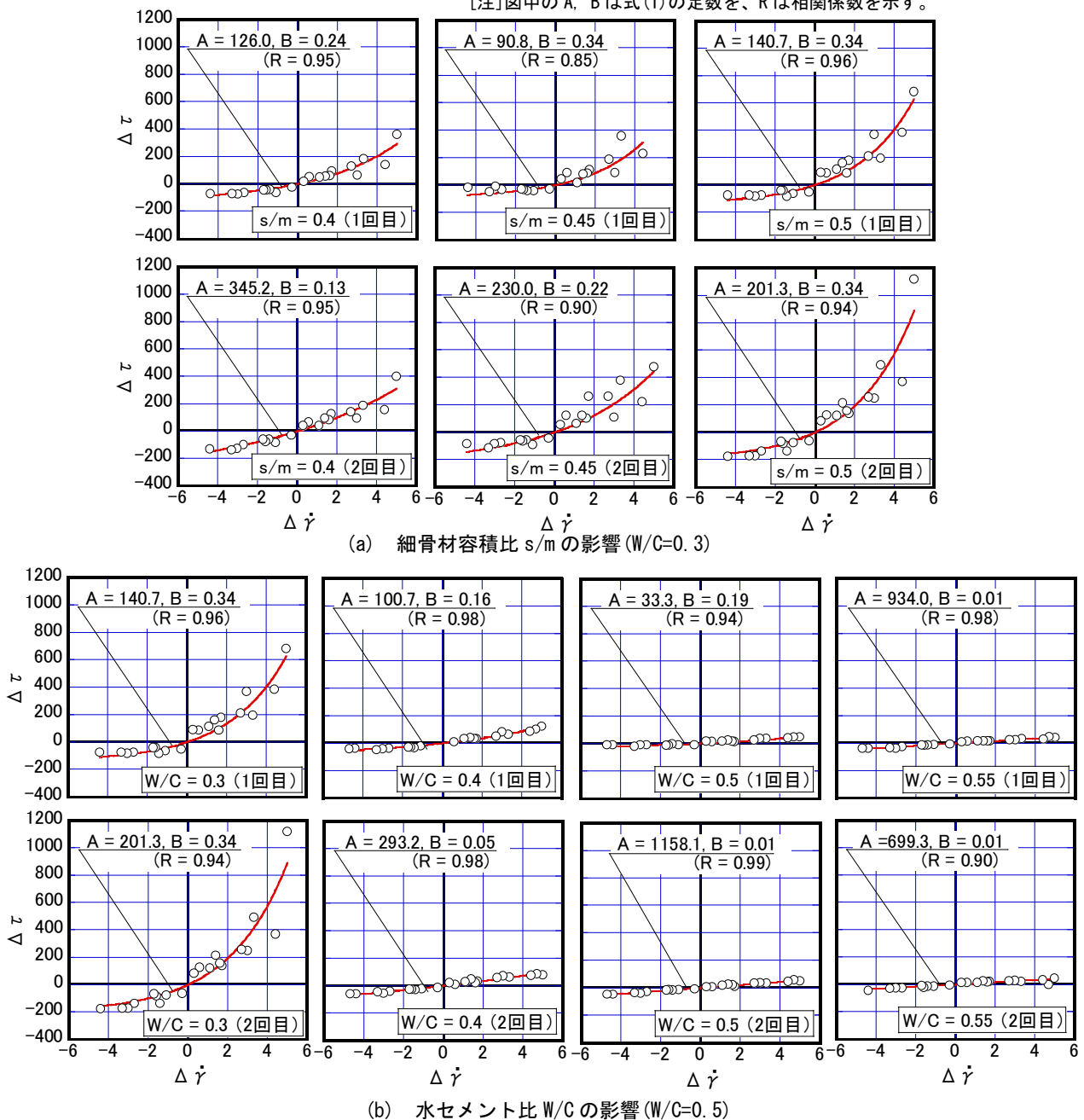


図-5 $\Delta\tau - \Delta\dot{\gamma}$ 関係の測定結果

いほど曲線の勾配が急になっているのが分かる。これは、低 W/C ほど単位水量が少ないため、骨材やセメント粒子などの接触の影響が強くなるためであると考えられる。また、既往の研究のデータ¹⁾においても同様の傾向が見られるが、W/C が 0.4 以上のものは W/C が 0.3 と比べて極端に $\Delta \tau$ の値が小さくなっている。これは、単位水量が増える事で、粒子の接触が少なくなり、ダイラタント流体としての性質が出にくくなるためであると考えられる。

1 回目の測定結果と 2 回目の測定結果の比較からは、W/C=0.3 の場合には経時変化に伴う傾きの増大が見られるが、W/C が 0.4 以上のものでは、もともとの $\Delta \tau$ の値が小さいこともあり、明確な差は見られない。

3.3 近似曲線の係数 A, B

ダイラタンシー特性の定量化に対する、式(1)の係数 A, B の適用性に関して検討を行う。図-6 に、図-5 で示した $\Delta \tau - \Delta \dot{\gamma}$ 関係を式(1)で近似したときの係数 A, B と各要因の関係を示す。

s/m との関係に注目すると、まず、A の値は s/m が変化する事による明確な傾向は見られないが、1 回目と 2

回目の比較から、経時変化により値が増大する傾向が見られる。一方、B の値は s/m が大きくなる、すなわちダイラタンシー特性が強くなるほど大きくなる傾向がある

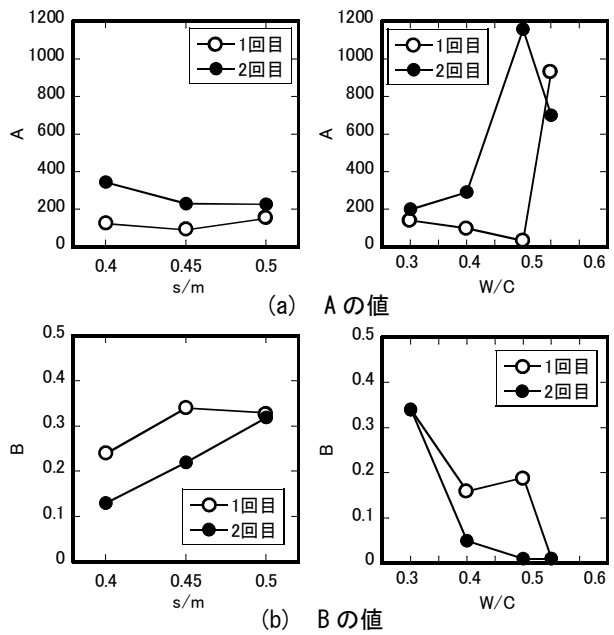
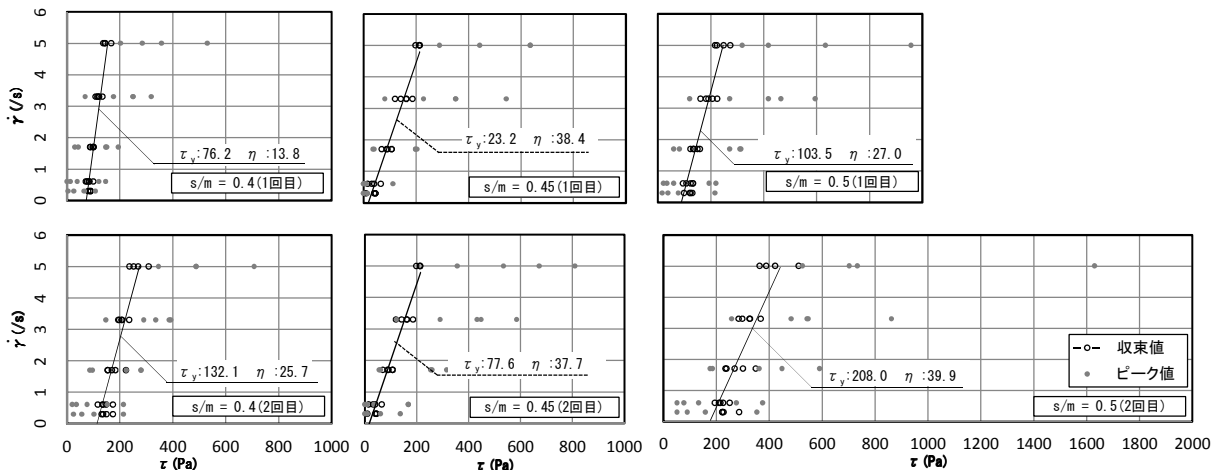
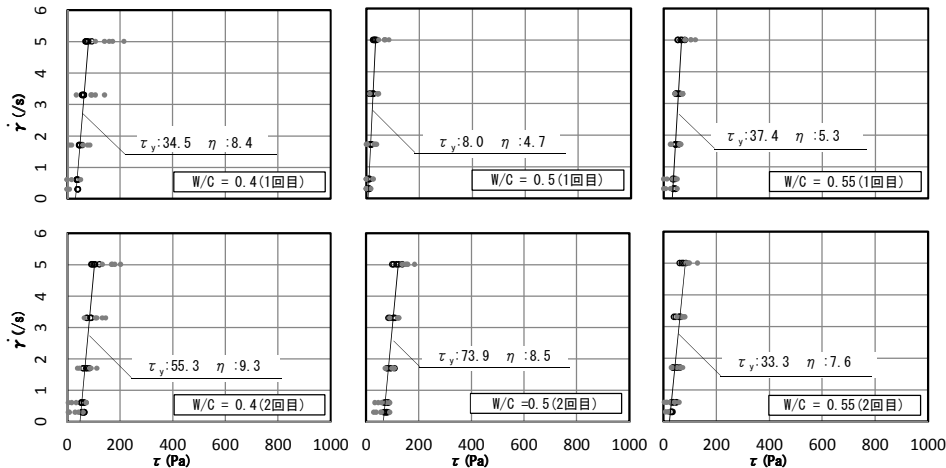


図-6 係数 A および B と各要因の関係



(a) 細骨材容積率 s/m の影響 (W/C=0.3)



(b) 水セメント比 W/C の影響 (s/m=0.5)

図-7 コンシステンシー曲線の比較

が、1回目と2回目の比較から、経時変化後には逆に小さくなる結果となっている。

次に、W/C との関係からは、1回目と2回目の比較から、Aの値は2回目の方が大きく、Bの値は2回目が小さいという傾向はs/mの場合と同じであり、また、Bの値は、W/Cが小さくなるほど、すなわちダイラタンシー特性が強くなるほど大きくなる傾向も見られる。しかし、Aの値は、W/Cが0.4以上で極端に大きな値や小さな値をとるなど、非常にばらつく結果となっている。これは、図-5から明らかなように、ダイラタンシー特性が強く表れない試料では、 $\Delta\tau - \Delta\dot{\gamma}$ 関係がほぼ線形の関係となっており、この場合に、式(1)の形で近似を行うと、相関係数Rは比較的高い値で近似できるものの、A,Bの値は少しの実験データのずれで大きく値が影響されるなど、式(1)を適用すること自体に問題があると思われる。

以上の結果より、 $\Delta\tau$ の値が大きく現れるダイラタンシー特性の強い試料に対しては、式(1)による近似はある程度妥当性のあるものとなる可能性はあるが、ダイラタンシー特性の弱い試料に対しては、式(1)はそのまま適用すべきでない。ただし、このダイラタンシー特性の弱い試料は、 $\Delta\dot{\gamma}$ が発生した際もほとんど $\Delta\tau$ が発生しないため、後述するビンガムモデルとしてモデル化でき、そもそも式(1)などのダイラタンシー特性のモデル自体を適用する必要がないものといえる。

3.4 コンシステンシー曲線

図-7に、コンシステンシー曲線を示す。同図中の収束値とは、図-4に示すせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ を変化させる直前のせん断応力 τ がほぼ収束した値を示し、ピーク値とは $\dot{\gamma}$ を変化させた直後の値を示す。

ピーク値に関しては、 $\dot{\gamma}$ を与える履歴によって変動す

るため、 $\dot{\gamma} - \tau$ 平面上における τ の取り得る範囲の目安程度のもとなるが、同一の $\dot{\gamma}$ でも $\Delta\dot{\gamma}$ が異なることによりピーク値は違いがあることが分かる。

一方で、収束値に関しては、 $\dot{\gamma}$ の与える履歴によらず、ほぼ $\dot{\gamma}$ ごとに一定の値となっていることがわかる。また、この収束値の $\dot{\gamma} - \tau$ 関係はほぼ線形となっていることから、ビンガムモデルによるモデル化が可能であると考えられる。

収束値のみで線形近似して得られたビンガム定数（塑性粘度、降伏値）と各要因の関係を図-8に示す。

本実験では、当初の0打モルタルフロー値を一定としてあるために、s/mとの関係からは、明確な傾向は見られない。W/Cに関しても、0.3で大きな値となっている以

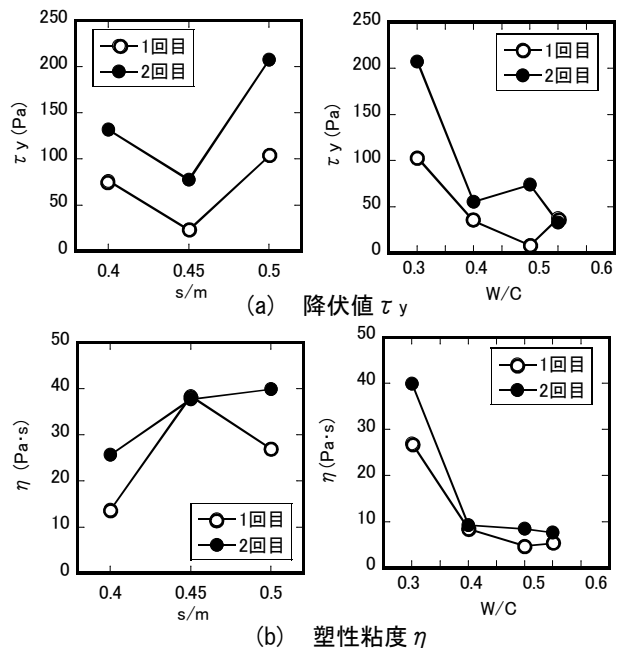


図-8 ビンガム定数と各要因の関係

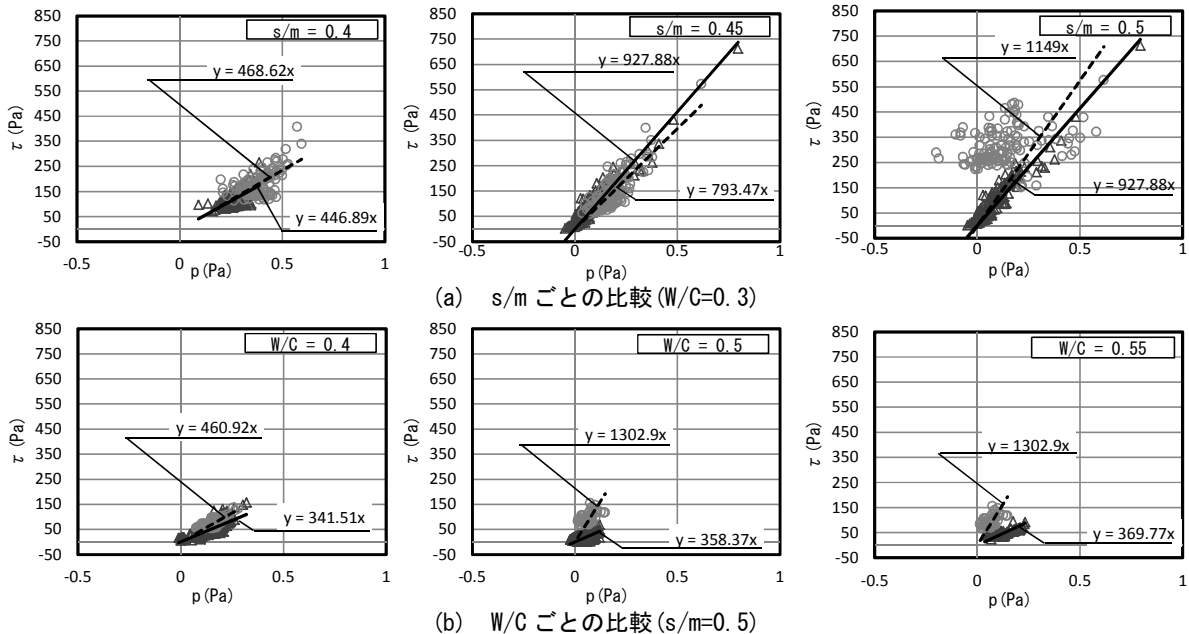
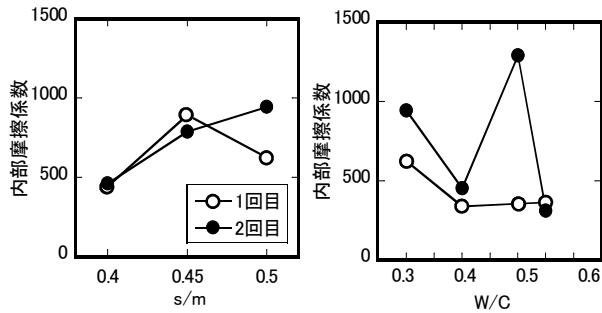


図-9 せん断応力 τ と有効応力 p の関係



図一 10 動的な内部摩擦係数と各要因の関係

外は明確な傾向が見られない。

本実験結果は、要因数および水準の幅が限られているため、明確な傾向が得られていない可能性もあるが、実際に試料に触れて攪拌などを行った感覚では、試料の流動性の違いは明らかであり、図-7中のピーク値、すなわちダイラタンシーによるせん断応力の変動まで含めたレオロジー特性の評価が必要となると思われる。

3.5 動的内部摩擦係数

サスペンションの変形・流動下における動的な内部摩擦係数の測定例は皆無に等しい。しかし、ダイラタンシーなどの内部粒子の接触を考慮した流動性の評価においては、非常に重要なパラメータとなる。

一般に、サスペンションに働く全応力 σ と、有効応力 p 、間隙水圧 u の関係は以下の式で表す事ができる。

$$\sigma = p + u \quad (3)$$

ここに、 σ : 全応力(Pa), p : 有効応力(Pa),
 u : 間隙水圧(Pa)

本実験では全応力 σ に相当する試料の側圧の測定は行っていないが、ここでは全応力 σ を一定とし、式(3)の関係から間隙水圧 u の変化量をそのまま有効応力 p の変化量と仮定して動的な内部摩擦係数を得ることを試みる。

図-9に、有効応力 p の変化量とせん断応力 τ との関係を示す。図中には、原点を通る直線で近似した結果も併示する。同図から、 $s/m = 0.45$ のように、高い線形性が見られるものがある一方で、バラツキが多く、明確な相関性が見られないものもある。このばらつきは、リブが水圧計の近くを通過することによる影響や、せん断すべり面の形成状態、および試料自体の不均一性によるものと考えられる。同図には1回目、2回目を重ねて示すが、一部の相関の悪い試料 ($s/m = 0.5$, $W/C = 0.5$) を除き、経時変化後においてもあまり差が見られていない。

図-10に、線形近似の結果から得られた動的内部摩擦係数と各要因の関係を示す。いずれの要因に対しても明確な相関は見られていないが、これは、そもそも内部摩

擦係数が、調合などによらず、使用材料の特性に影響を受けるものであるためと考えられる。今後、使用材料を変化させるなどして、より広範囲な検討を進める必要がある。

4. まとめ

本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- 1) s/m を要因としてフレッシュモルタルの $\Delta \tau - \Delta \dot{\gamma}$ 関係を比較すると、 s/m が大きいほど曲線の勾配は大きくなる。
- 2) W/C を要因としてフレッシュモルタルの $\Delta \tau - \Delta \dot{\gamma}$ 関係を比較すると、 W/C が小さいほど曲線の勾配は大きくなる。
- 3) 指数関数により $\Delta \tau - \Delta \dot{\gamma}$ 関係を近似することは可能である。しかしその係数は、ダイラタンシー特性の弱い試料に対して連続的に変化しないため、更なる検討が必要である。
- 4) せん断応力の収束値は、せん断ひずみ速度の履歴によらず、せん断ひずみ速度ごとにほぼ一定の値となるため、収束値に関してはビンガムモデルでモデル化が可能であると考えられる。
- 5) 動的な内部摩擦係数の計測を行った結果、本実験の範囲では、各要因との明確な相関性は検出されなかった。

謝辞

本研究を遂行するにあたって、北川大貴君（三重大学学生）の助力を得た。本研究費の一部は、平成22年度三重大学若手研究プロジェクト研究助成金（研究代表者：三島直生）によった。付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 三島直生, 大村修太郎, 畑中重光: 回転粘度計を用いたフレッシュモルタルのダイラタンシー特性の評価手法に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 74, No. 640, pp. 981-986, 2009. 6
- 2) 横山達資, 三島直生, 畑中重光: 回転粘度計を用いたフレッシュモルタルのダイラタンシー特性に関する研究: 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)A-1pp. 589-590, 2010. 8
- 3) 横山達資, 三島直生, 畑中重光: 回転粘度計を用いたフレッシュモルタルのダイラタンシー特性の定量化に関する基礎的研究: 日本建築学会東海支部研究報告集, 2011. 1
- 4) J.E.Wallevik: Rheological properties of cement paste: Thixotropic behavior and structural breakdown, Cement and Concrete Research, No.39, pp.14-29, 2009