

論文 有効応力に基づくフレッシュモルタルの粘塑性流動モデルの構築に関する実験的研究

横山 達資^{*1}・三島 直生^{*2}・畑中 重光^{*3}

要旨：本研究では、フレッシュコンクリートのレオロジー特性の定量化を目指してダイラタンシー特性に着目した検討を行っている。本報では、モルタルを試料として、空気量、フライアッシュおよびシリカフェームの混入量、増粘剤の添加量がレオロジー性質に及ぼす影響を把握するための実験を行った。その結果、空気量の増加、フライアッシュまたはシリカフェームによるセメントの置換、増粘剤の添加のいずれによっても試料のダイラタンシー特性の発現傾向を弱くし、平衡状態の塑性粘度も小さくできる事、さらに、フレッシュモルタルのせん断抵抗は定常状態も含めて、有効応力に基づいて説明できる可能性がある事が分かった。

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、有効応力、間隙水圧、内部摩擦係数

1. はじめに

1.1 研究の背景

近年、鉄筋コンクリート構造物に要求される性能は高度化しており、それに伴う使用材料の多様化や鉄筋の過密化、また骨材事情の悪化等によりコンクリートの打設難易度の上昇が問題となっている。充填不良やポンプ圧送時の閉塞が起これば、RC構造物は設計通りの性能は発揮できず、一度発生した施工不良はその改修に多大な労力とコストを費やすことになる。これに対し、品質の確保や、施工性の予測に重要と考えられるフレッシュコンクリートの流動性の評価に関する研究はあまり進んでいないのが現状である。筆者らの過去の研究からは、ダイラタンシーに起因すると考えられるせん断ひずみ速度が急変した際にせん断応力が増減するオーバーシュート現象が確認されている¹⁾。このうち、応力が減少する現象は振動時の流動化のメカニズムであり、応力の上昇は流動時の閉塞の原因となると考えられることから、この特性を適切に評価する事が必要であると考えられる。

1.2 フレッシュコンクリートのレオロジーに関する既往の研究

一般的なフレッシュコンクリートの流動モデルとしてはビンガムモデルがよく用いられるが、均質な粘塑性体と仮定したこのモデルでは、施工時に重要になると考えられる加振時の流動化現象や閉塞現象を説明する事ができない。また、余剰ペースト膜厚理論に代表される理論モデル²⁾では、固体粒子の接触を考慮できないため、高濃度サスペンションであるフレッシュコンクリートのダイラタンシー特性のモデル化には限界がある。

李らは応力制御型のせん断ボックス試験機を用いた実験を行い、ダイラタンシーと粒子のインターロッキング

グに依存するせん断変形モデルを提案している^{3), 4)}。しかし、ダイラタンシー特性そのものに関する研究は極めて少ないのが現状である。筆者らのこれまでの研究によれば、フレッシュモルタルのダイラタンシー特性は、せん断ひずみ速度（以下、 $\dot{\gamma}$ ）の変化に起因するせん断応力（以下、 τ ）の変化に大きく影響を受けていることが分かっており、それぞれの変化量を $\Delta\dot{\gamma}$ 、 $\Delta\tau$ とすると、それらの関係は試料ごとに一本の曲線で決まる事が分かっている⁵⁾。本報では、フレッシュモルタルのダイラタンシーを含めた流動モデルの作成に向けて、固体粒子間の接触と摩擦に注目して、調査要因の影響を明らかにする事を試みる。

2. 実験の概要

2.1 実験の要因と水準

表-1に本実験の要因と水準を示す。既報⁵⁾においてモルタルのW/Cおよび細骨材容積率を要因とした実験を行っているため、本報では空気量および混和材料の混入の影響を確認する事を目的とする。混和材としては流動性に大きく影響すると考えられるフライアッシュおよびシリカフェームを用い、混和剤として増粘剤を用いた。

2.2 使用材料

本実験で用いた試料の調合表を表-2に、材料の種類お

表-1 試料の要因と水準

要因	水準
空気量(%)	1.5, 5.0, 10.0, 20.0
フライアッシュ(%)*	0, 20, 40
シリカフェーム(%)*	0, 4, 8, 12
増粘剤(%)**	0, 0.02, 0.04

[注]*セメントに対する容積置換率、**セメントに対する質量添加率

*1(株)飯島建築事務所 (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)

表-2 調合表

記号	要因	水準	W/C	s/m	単位量 (g/ℓ)					高性能AE減水剤 (%×C)	AE剤 (%×C)	消泡剤 (%×C)	増粘剤 (%×C)	Air (%)	Flo	
					W	G	S	FA	SF							
M1	標準	-	0.25	0.5	220	881	1275	-	-	0.80	-	-	-	4.6	260	
M2	Air	2			220	881	1275	-	-	0.88	-	0.3	-	-	1.8	265
M3		10			220	881	1275	-	-	0.88	0.005	-	-	-	10.0	257
M4		18			220	881	1275	-	-	1.16	1.116	-	-	-	18.0	259
M5		20			220	705	1275	123	-	0.80	-	-	-	-	6.0	246
M6	FA	40			220	528	1275	246	-	1.00	-	-	-	-	6.0	254
M7		4			220	846	1275	-	34	0.83	-	-	-	-	8.4	260
M8	SF	8			220	811	1275	-	65	1.20	-	-	-	-	8.2	252
M9		12			220	775	1275	-	93	0.00	-	-	-	-	7.2	255
M10		TH			0.02	220	881	1275	-	-	1.30	-	-	0.02	20.0	252
M11	0.04				220	881	1275	-	-	1.61	-	-	0.04	17.0	261	

[注]s/m:細骨材容積率 FA:フライアッシュ SF:シリカフューム TH:増粘剤 Air:空気量 Flo:0打モルタルフロー値

表-3 使用材料

材料	記号	種類	品質
細骨材	S	町屋川産川砂	表乾密度:2.55g/cm ³ , 粗粒率:2.8, 実積率:65.4%
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度:3.16g/cm ³ , 比表面積:3430cm ² /g
フライアッシュ	FA	フライアッシュⅡ種	密度:2.25g/cm ³ , 比表面積:3460cm ² /g, 強熱減量:2.0%
シリカフューム	SF	エジプト産粉末シリカフューム	密度:2.20g/cm ³ , 比表面積:165000cm ² /g
混和剤	-	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系
	-	AE剤	高級脂肪酸および非イオン系界面活性剤系
	-	消泡剤	ポリアルキレングリコールモノアルケニルエーテル系
	TH	増粘剤	セルロース系

よび品質を表-3に示す。

W/Cは0.25, 細骨材率は0.50, 0打モルタルフロー値は255±10でそれぞれ一定とした。低W/Cかつ高モルタルフロー値としたのは回転粘度計での測定時に良好な試料の変形性状を得るためである。フライアッシュおよびシリカフュームは表-1に示す置換率でセメントの容積に対し内割で混入した。

2.2 実験方法

試験装置には試作したモルタル用回転粘度計¹⁾を用いた。測定装置の概要を図-2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5μm)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-2(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として測定した。

本実験で用いたせん断ひずみ速度のプログラムを図-3(a)に示す。用いたひずみ速度は0.4, 0.7, 2.0, 4.0, 6.0, 7.8(1/s)の6種類で、それらを連続的に変化させている。なお、測定の状態を安定させるために試料の練り後約20分間静置した後に練りさじで攪拌した後の試料を用いた。

3. 実験結果と考察

3.1 測定結果の時刻歴

図-3(b), (c)に本実験の結果から得られたせん断応力 τ , および間隙水圧 u の時刻歴の例を示す。同図から、既報¹⁾と同様の傾向が見られ、 $\dot{\gamma}$ が変化した瞬間に τ の

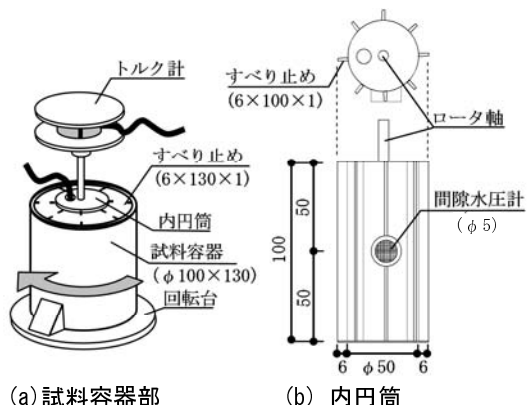


図-2 測定装置の概要(単位: mm)

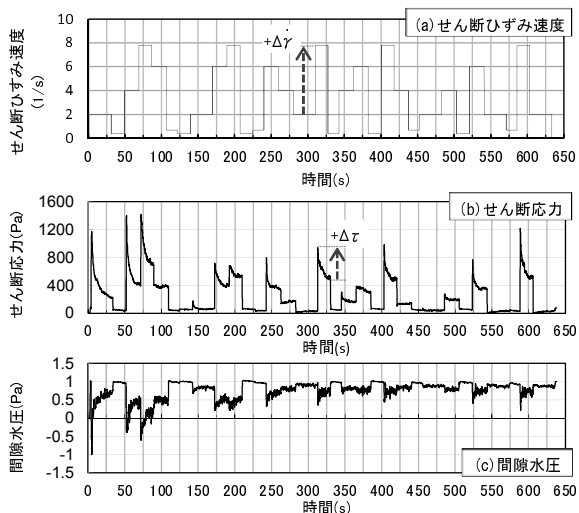


図-3 測定結果の時刻歴の例(標準調査)

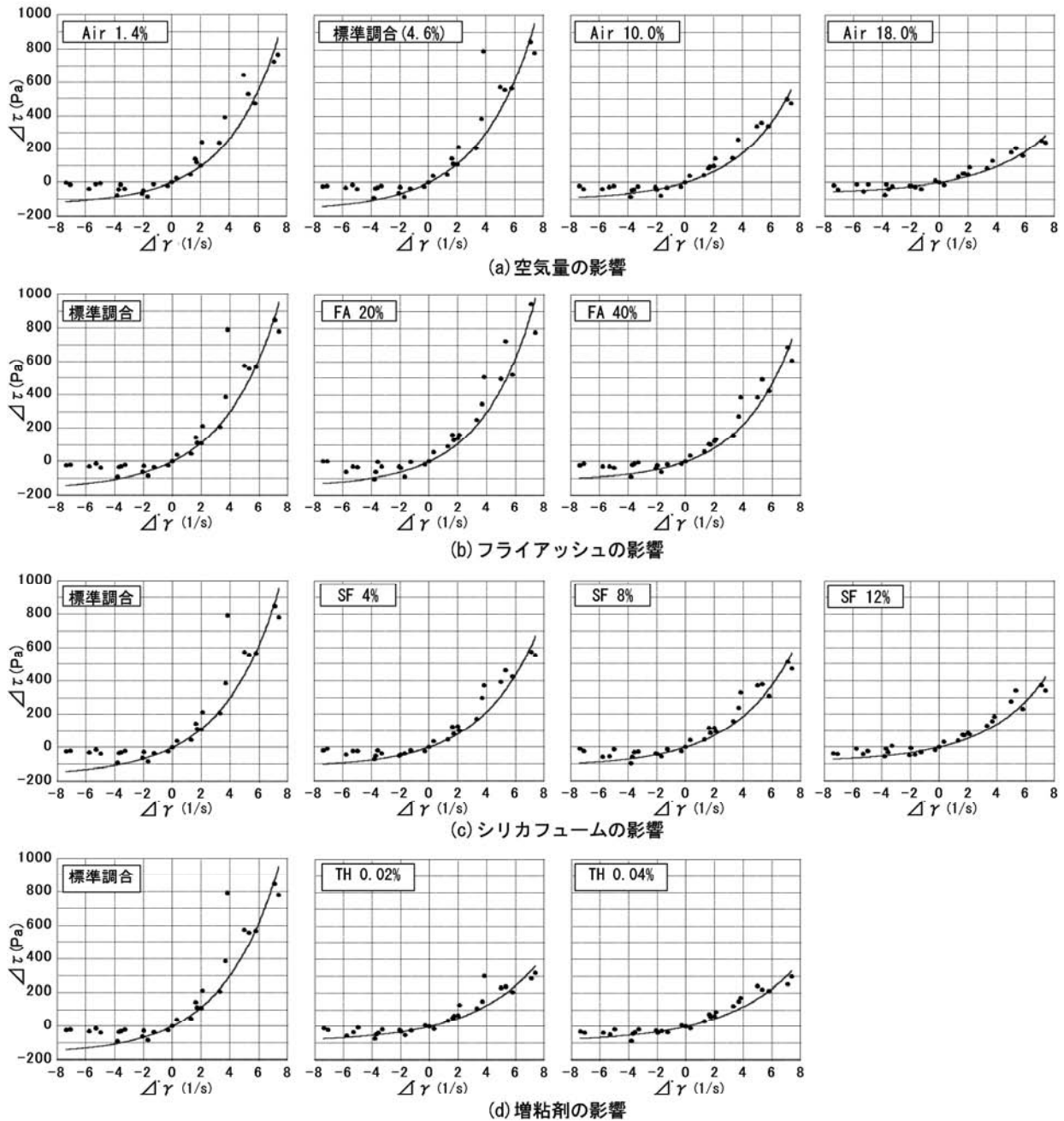


図-4 $\Delta \tau - \Delta \dot{\gamma}$ 関係

値は増加または減少している。ここで、図中に示すように、本実験においても $\dot{\gamma}$ 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（一定の $\dot{\gamma}$ 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⁶⁾ことが多いが、図-3(c)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 τ が減少した際には u 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

図-4に、本実験で測定された $\Delta \tau - \Delta \dot{\gamma}$ 関係の例を示す。同図によると、空気量が多いほど、また混和材料の容積置換率や添加率が大きいほど、曲線の曲率は小さくなりダイラタンシー特性、すなわち、 $\dot{\gamma}$ の変化時の τ の変動量が小さくなるのがわかる。この原因は、まず空気量の影響については、固体粒子間の接触を連行空気が妨げる事による効果と同時に、ダイラタンシーによる体積の膨張の際に、空気が膨張し間隙水圧の低下を軽減する作用もあると考えられる。フライアッシュおよびシリカフュームをセメントと置換した調合については、粒子形状が球形であることの影響が関係していると考えられる。

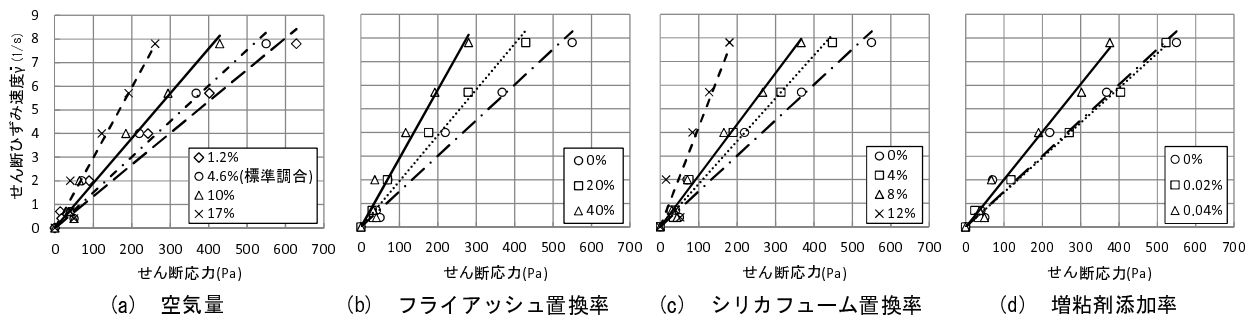


図-5 平衡状態のコンシステンシー曲線

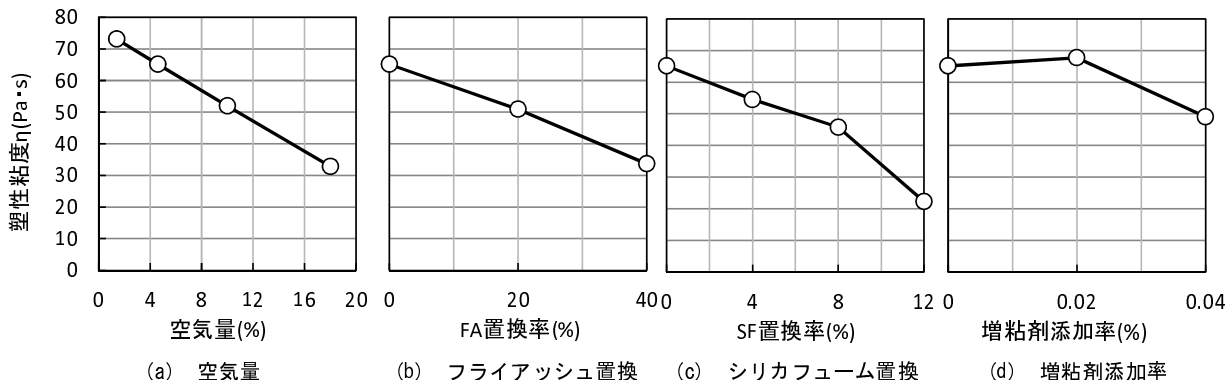


図-6 塑性粘度の比較

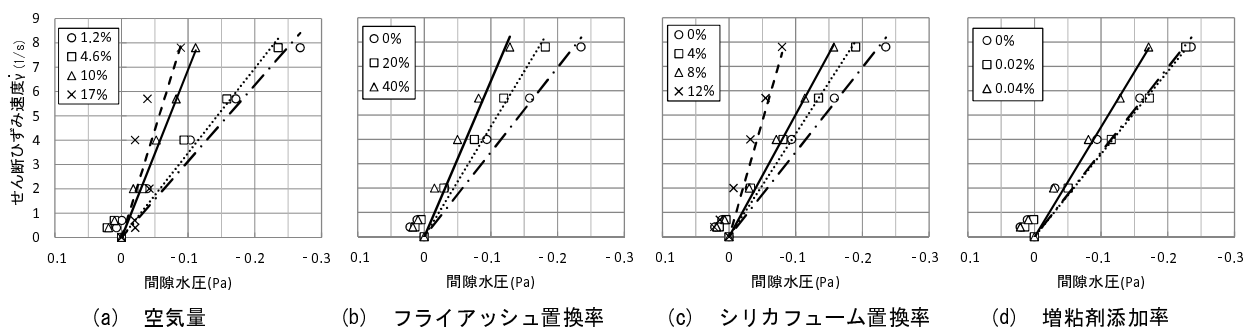


図-7 平衡状態の水圧とせん断ひずみ速度の関係

すなわち、高濃度サスペンションにおいて角型の粒子は球形の粒子に比べ粒子の接触の度合いが多いという結果が得られており⁷⁾、粒形の悪いセメントに対してフライアッシュやシリカフェームなどの球形の粒子を置換することで、固体粒子の接触の影響が小さくなり、その結果、せん断応力のオーバーシュートも弱くなったと考えられる。また、シリカフェームの方が少量の置換で影響が表れるのは、微細な粒子が混入する事によるボールベアリング効果によるものと考えられる。増粘剤を添加した試料については、添加量による差は見られなかったが、無添加の試料と比較すると曲線の曲率は小さくなっている。これは増粘剤が潤滑剤として働き、粒子間の接触を減らした事によるものと考えられる。

3.4 コンシステンシー曲線

図-5に、本実験より得られた定常状態の τ の平均値を用いた場合のコンシステンシー曲線を示す。ここで、定

常状態とは $\dot{\gamma}$ が変化する直前の値と定義した。既報⁵⁾から、定常状態に達した試料の $\dot{\gamma} - \tau$ 関係は線形となり、ビンガムモデルとして表現することが可能である事が分かっている。本実験では、0打モルタルフロー値250前後の高流動モルタルを用いているため、降伏値 τ_y はどの試料も0に近い値である。図-6に塑性粘度の比較を示す。各要因・水準ごとの塑性粘度に着目すると、空気量が多いほど、また混和材料の置換率が大きいほど、塑性粘度は小さくなっているのが分かる。ここで、定常流動状態における高濃度サスペンションのせん断抵抗の発現メカニズムに関して考察を加える。図-5のせん断応力 τ を得たのと同じ時点における間隙水圧 u をx軸としてせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ と間隙水圧 u の関係をプロットした結果を図-7に示す。ここで、間隙水圧軸は左右を反転して示す。これは、間隙水圧が減少した場合に有効応力が増大し、せん断抵抗が大きくなると考えられるためである。図に

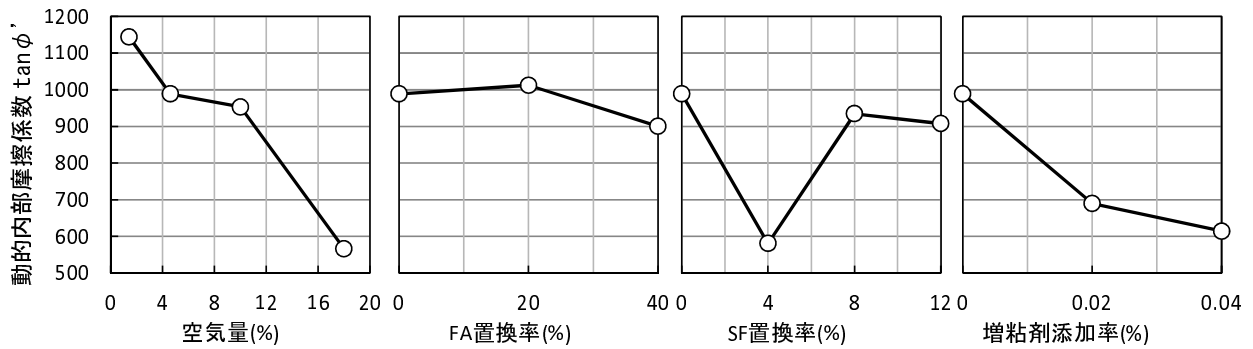


図-9 動的内部摩擦係数 tan φ' の比較

よれば、図-5 のコンシステンシー曲線とほぼ同様な関係が得られている。これは、定常状態のせん断ひずみ速度の違いによるせん断応力の変化も、間隙水圧によって説明できることを示している。すなわち、本実験の範囲では、塑性粘度が間隙水圧の変動、すなわち有効応力の変動によって発生しており、固体粒子の内部摩擦で高濃度サスペンションのほぼ全てのせん断抵抗を説明できるものと考えられる。ただし、現時点ではこの定常状態における、せん断ひずみ速度の違いによる間隙水圧の変動の原因は明らかではない。これは、前述の $\Delta \tau - \Delta \dot{\gamma}$ 関係で述べたような、せん断ひずみ速度の変動時の粒子の充填状態が移行する際の過渡的な状態ではないために、塑性粘度の発生原因がダイラタンシーでは説明できない。この点に関しては、今後、検討を進めていく予定であるが、本実験結果からは、固体粒子間の接触が少なくなるほど、塑性粘度が小さい、すなわち、間隙水圧の値も相対的に大きくなる結果となっていることから、定常流動時の間隙水の流速の変化が間隙水圧に影響している可能性が考えられる。

また、本実験では、経時変化などに大きく影響するセメントの凝集の影響は小さい試料を用いており、セメントの凝集によるチキソトロピーの影響に関しては別途検討が必要となる。

3.5 動的内部摩擦係数

地盤工学の分野において、土のせん断耐力は一般的にモール・クーロンの破壊条件により表現される。

$$\tau = p \tan \phi + c \quad (1)$$

ここに、 τ : せん断応力(Pa), p : 有効応力(Pa),
 $\tan \phi$: 内部摩擦係数, c : 粘着力(Pa)

同式における内部摩擦係数 $\tan \phi$ は土粒子間の静止摩擦係数であるが、本論では流動下のフレッシュモルタルで測定された値であるため、これを動的内部摩擦係数 $\tan \phi'$ として定量化する事を試みる。ここで、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。

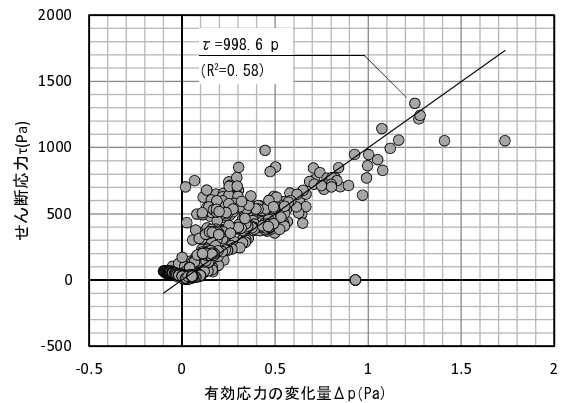


図-8 せん断応力 τ と有効応力の変化量 Δp の関係の例

$$\sigma = p + u \quad (2)$$

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、装置の特性上不可能であるため行っていないが、ここでは全応力 σ を一定と仮定し、式(2)の関係から間隙水圧の変化量をそのまま有効応力の変化量(すなわち $\Delta p = -\Delta u$)と仮定する。また、実験結果からは、負のダイラタンシーによる液状化時には試料のせん断応力はほぼ0になっていることから、粘着力 c については0とする。よって、動的内部摩擦係数 $\tan \phi'$ とせん断応力 τ の関係は以下のように表せる。

$$\tau = \Delta p \tan \phi' \quad (3)$$

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これまで皆無に等しい。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と考えられる。図-8に本実験結果より得られたせん断応力 τ と有効応力の変化量 Δp の関係の一例を示す。ここで Δp とは、測定開始時からの間隙水圧 Δu の変化量の絶対値としている。同図によれば、バラツキは大きいものの、両者の関係は一本の直線で表されると見る事ができる。図-9に

各要因・水準ごとの動的内部摩擦係数 $\tan \phi'$ の測定結果を示す。同図によると空気量の増加、増粘剤の添加によって $\tan \phi'$ が減少する傾向がみられた。これにより有効応力の増加量が同じであっても τ のピークは小さくなり、閉塞等の可能性が小さい試料であると評価する事ができる。一方、フライアッシュ、シリカフェームを混入した場合には明確な値の差は見られなかった。

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) 空気量が大きいほど、フライアッシュまたはシリカフェームのセメントに対する置換率が大きいほど、増粘剤の添加率が大きいほど、ダイラタンシーによるせん断応力の変動は減少し、定常流動状態の塑性粘度も減少した。
- 2) 定常流動状態の塑性粘度は、せん断ひずみ速度の違いによる間隙水圧の変化に起因して発生している可能性があり、この場合には、フレッシュモルタルのせん断抵抗のほとんどが固体粒子の内部摩擦により説明できる可能性がある。
- 3) 空気量が大きいほど、増粘剤の添加率が大きいほど、動的な内部摩擦係数は減少する傾向が見られたが、フライアッシュおよびシリカフェームでセメントの一部を置換した場合には、明確な動的内部摩擦係数の変化は見られなかった。

本研究の結果からは、高濃度サスペンションであるフレッシュモルタルのせん断応力 τ は、定常・非定常いずれの状態においても間隙水圧の関数になる。ただし平衡状態において、せん断ひずみ速度により平衡間隙水圧が異なる事に関するメカニズムについては今後検討を要する。この考え方によれば、調合を決定する際にせん断応力のピーク値を下げるためのいくつかの方法が考えられるようになる。例えば、間隙水圧の変動量や動的内部摩

擦係数を小さくするための材料や調合を選定する。または与えられるせん断ひずみ速度の変動量を制限した施工計画を立てるなどである。これらの方法を用いれば、閉塞などの危険性を予測し、材料の設計に活かす事ができると考えられる。

謝辞

本実験で使用した混和剤は竹本油脂株式会社よりご提供いただいた。本研究費の一部は、平成23年度科学研究費補助金 若手研究(B) (研究代表者：三島直生) による。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) C. T. Kennedy: The Design of Concrete Mixes, Proceedings of the American Concrete Institute, vol. 36, 373 (1940)
- 3) 李柱国, 李潔勇: フレッシュコンクリートのせん断変形特性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, vol. 75, No. 653, 1173-1180, 7, 2010
- 4) 李潔勇, 李柱国: EFFECT OF BOUNDARY RESTRAINT ON FLOW OF FRESH CONCRETE THROUGH OPENING, 日本建築学会構造系論文集 vol. 76, No. 665, 1189-1197, 7, 2011
- 5) 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研究, コンクリート工学年次論文集, vol. 33, No. 1, pp. 1217-1222, 2011
- 6) 例えば, J. E. Wallevik: Rheological properties of cement paste: Thixotropic behavior and structural breakdown, Cement and Concrete Research, No. 39, pp. 14-29, 2009
- 7) 三島直生, 谷川恭雄, 森博嗣, 黒川善幸, 寺田謙一, 服部俊範: 骨材粒子混入によるフレッシュコンクリートのレオロジー性状の変化に関する研究, 日本材料学会会誌, vol. 48, No. 8, pp. 858-863