

# 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

## STUDY ON EVALUATION OF DILATANCY PROPERTIES OF FRESH MORTAR BY COAXIAL CYLINDRICAL ROTATION RHEOMETER

三島直生\*<sup>1</sup>, 大村修太郎\*<sup>2</sup>, 畑中重光\*<sup>3</sup>

*Naoki MISHIMA, Shutaro OMURA and Shigemitsu HATANAKA*

In recent years, it becomes necessary to estimate the workability and consistency with good accuracy. Main purpose of this study is to establish a rheological model of fresh concrete that can consider the properties of dilatancy. Fundamental experiments using coaxial cylindrical rotation rheometer were carried out on the behavior of fresh mortar. From the visualized experiment on the inside of fresh mortar, it was clarified that there is some complicated deformation in the fresh mortar. Also, from the measurement of shear stress, it was demonstrated that rheological properties of fresh mortar are greatly influenced by the change of shear stress which is thought to be caused by the dilatancy. Further, a strong relationship was clarified between the amounts of change in shear strain rate and shear stress.

**Keywords :** *Fresh Mortar, Rheology, Coaxial Cylindrical Rotation Rheometer, Dilatancy, Dense Suspension*

フレッシュモルタル, レオロジー, 回転粘度計, ダイラタンシー, 高濃度サスペンション

### 1. はじめに

近年、骨材事情の悪化、高耐久コンクリートの要求による低水セメント比化（高粉体化）、配筋量の増加などにより、フレッシュコンクリートのポンプ施工や型枠への充填が困難な場合が生じてきている。このような状況で、高品質な鉄筋コンクリート構造物を安定的に生産するためには、フレッシュコンクリートのコンシステンシーおよびワーカビリティの正確な評価とその改善が急務となる。

フレッシュコンクリートの流動性に関しては、依然として不明な部分が多い。また上述したような施工上の問題を解消する方法として、材料分離が生じない範囲で AE 減水剤などの混和剤によりコンクリートを流動化させることが対策の主流となっている様に思われる。しかし、安易な流動化はフレッシュコンクリートの充填不良や閉塞を助長してしまう可能性もある。

一般に、骨材の粒形がいびつとなる場合や、粉体量が増加する場合には、「フレッシュコンクリートの粘性が増加する」と認識されている。しかし実際には、一部の特殊な混和剤を用いたものを除いて、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せん断抵抗は、その大部分が固体粒子間の接触に起因したものと考えられ、その挙動は粘性のそれとは感覚的にも大きく異なる場合が多い。例えば、混和剤の添加により流動化させ、感覚的に軟らかいと感じた試料でも、変形の与え方によっては瞬間的に固体化し、閉塞や充填不良などの問題が発生する可能性がある。しかし、現状ではこれらの現

象については「(偶発的な)骨材粒子のアーチングによる」などと説明されるなど、材料の恒常的な特性としては評価されておらず、またそのような評価をするためのモデルも十分に整備されていない状況である。

### 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

これまでに行われてきたフレッシュコンクリートのレオロジーに関する実験的研究では、そのほとんど全てにおいてレオロジーモデルを均質な粘塑性体であるビンガムモデルと仮定し、レオロジー定数の測定が試みられてきた<sup>1)</sup>。また、理論的な研究では、余剰ベースト膜圧理論<sup>2), 3)</sup>に代表される均一な分散系、すなわち、骨材間の直接的な接触が無いものと仮定される状態の検討が主に行われてきた。これらの評価は、フレッシュコンクリートの定常流の評価などにおいてはある程度の妥当性も考えられるが、現実のコンクリートの施工現場において問題となっている様々な挙動（閉塞、振動による流動化、経時変化など）を評価する上で最も重要となる粒子間の接触状態を無視しているという点において、妥当性に欠けると考えられる。

これらの問題に対して、粒子の分散状態や粒子間の接触の影響をレオロジー的に評価し、モデル化を行おうとする研究もある。具体的には、チキソトロピーおよびダイラタンシーの影響をフレッシュコンクリートのレオロジーモデルに反映させようとする研究<sup>4)7)</sup>で

本論文は、参考文献<sup>9)-11)</sup>をもとに修正を加えたものである。

\*<sup>1</sup> 三重大学大学院工学研究科 助教・博士(工学)

\*<sup>2</sup> 旭化成建材㈱ 修士(工学)

\*<sup>3</sup> 三重大学大学院工学研究科 教授・工博

Assist. Prof., Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ., Dr. Eng.  
Asahi Chemical Construction Materials Co., M. Eng.  
Prof., Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ., Dr. Eng.

ある。筆者らもこれまでに、主にダイラタンシーに着目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定量化を目的とした実験的研究<sup>9)</sup>を行ってきた。

これに対して本論文では、まず、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、正確なレオロジー性質の評価手法に関して検討する。また、ダイラタンシーに起因すると考えられるせん断応力の変化挙動の評価方法について、基礎的な考察を加える。

### 3. 実験概要

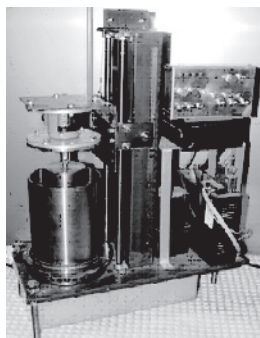
試験装置には写真1の試作したモルタル用回転粘度計を用い、内円筒には試料との付着を改善する目的で作成した硬化モルタル製ロータ(W/C=65%、細骨材容積比  $s/m=0.55$ 、気中養生、材齢2ヶ月)を用いた。内円筒サイズは $\phi 50 \times 100(\text{mm})$ とした。

実験の要因と水準を表1に、試料の調合表を表2に示す。また、図1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1(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1(b)参照〕して試料のせん断応力の測定を行った。静置時間10minとした試料では、内円筒の挿入後に10min間静置し、そのまま測定した。

測定後はそのまま硬化させ、材齢7日で型枠を脱型し、図1(d)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0.5g/L添加した。

せん断応力の測定時には、それぞれせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ を1.7→3.3→0.6→5.0→0.3→0.0 (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°)ずつ変形を与えた。ここで $\dot{\gamma}$ の測定順については、経時変化の影響を除外するため、ランダムとした。また、通常、回転粘度計を用いて試料のせん断抵抗を測定する際には、せん断ひずみ速度を変化させた後に、トルクが安定した時の値を測定する。これに対して本研究では、トルクが安定するまでの変動履歴に着目し、この部分の測定結果の分析から流動特性の評価を試みる(図2参照)。この場合のせん断応力の変動は、同一せん断ひずみ速度におけるものとなるため、一般に用いられるコンシステンシー曲線上に示すと図3のように示すことができると考えられる。ただし、本論文の測定結果は、図中の矢印の範囲の一部となる。



＜モルタル用回転粘度計＞  
形式：外円筒回転型  
外円筒サイズ： $\phi 100 \times 130(\text{mm})$   
内円筒サイズ： $\phi 50 \times 100(\text{mm})$   
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  $2\text{N} \cdot \text{m}$ 、  
分解能  $4.0 \times 10^{-4} \text{N} \cdot \text{m}$   
(ダイヤフラム型)  
回転計：分解能  $0.1^\circ$

写真1 モルタル用回転粘度計

表1 実験の要因と水準

要因	水準
試料	モルタル
水セメント比 W/C	0.25, 0.38, 0.50
0打モルタルフロー値	190, 220, 250
静置時間 (min)	0, 10
細骨材容積比 s/m	0.45, 0.50, 0.55

[注] 〃: 主となる要因

表2 試料の調合表

W/C	s/m	単用量 (g/L)			SP/C (%)	目標FL <sub>0</sub>	実測FL <sub>0</sub>	シリーズ
		W	C	S				
0.25	0.50	441	1762	2550	0.54	220	229	①
	0.45	599	1577	2295	0.17	220	214	②
0.38	0.50	545	1434	2550	0.27	190	185	③
					0.39	220	227	④
					0.45	250	262	⑤
0.50	0.55	490	1290	2805	0.50	220	209	⑥
0.50	0.50	612	1223	2550	0.13	220	205	⑦

[注] SP: 高性能 AE 減水剤 FL<sub>0</sub>: 0打モルタルフロー値

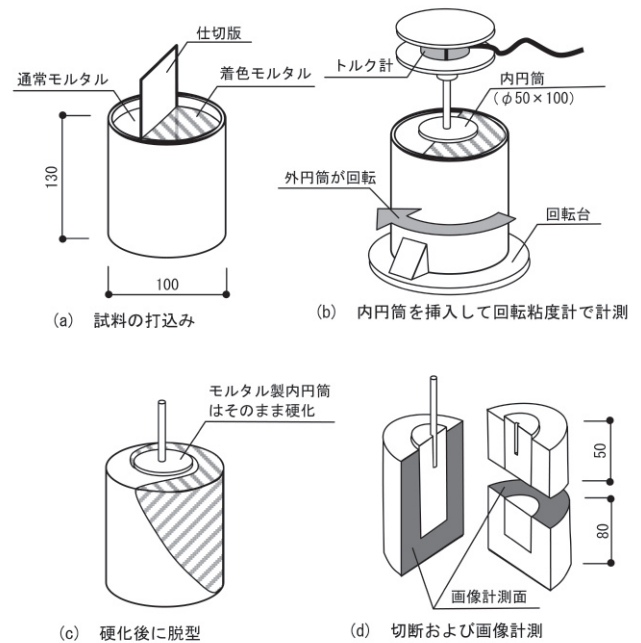


図1 測定方法の概要 (単位:mm)

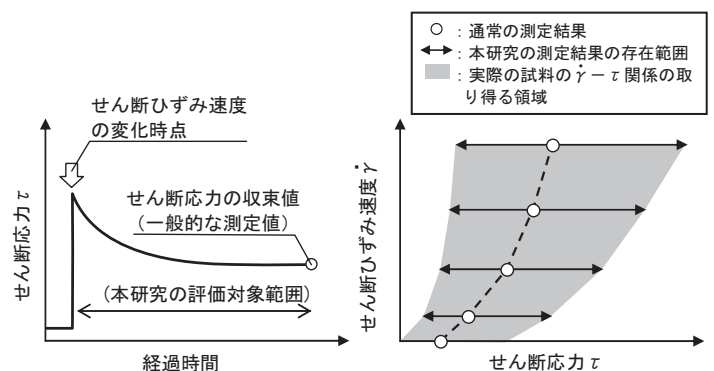


図2 本研究におけるせん断応力とせん断ひずみ速度の関係の例

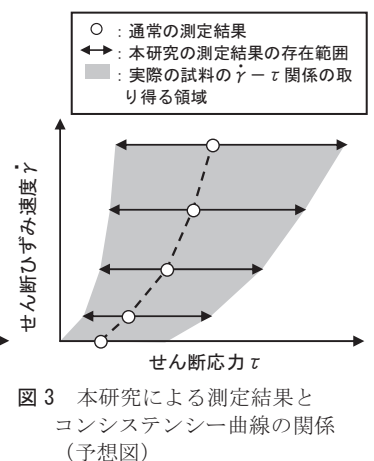


図3 本研究による測定結果とコンシステンシー曲線の関係 (予想図)

表3 モルタル内部の変形状態と目視評価結果

W/C		0.25			0.38			0.50		
s/m		0.50		0.45		0.50		0.55	0.50	
FL <sub>0</sub>		220		190	220	250	220			
静置時間	0min	水平面				(基本調合)				
		鉛直面								
変形状態	表面 <sup>※1</sup>	無		無		無		有	無	
	内部 <sup>※2</sup>	○		△		△		○	△	
静置時間	10min	水平面	※3							
		鉛直面	※3							
変形状態	表面 <sup>※1</sup>	—		有		無		有	有	有
	内部 <sup>※2</sup>	—		○		○		○	○	○

[注]※1：試料上面での目視評価[有:外円筒表面でのすべり有り、無:外円筒表面でのすべり無し]

※2：試料の変形状態[○:全断面で変形、△:ロータ付近のみ変形、×:変形していない]

※3：流動性が極端に低下し、正常な変形をしなかったため割愛

4. 試料内部の可視化に関する実験結果とその考察

試料内部の変形状態を表3に示す。なお、水セメント比0.25の10min後の試料は流動性が極端に低下し、正常な変形をしなかったため割愛した。

同表中には、試験時の試料上面の目視観察から判断した外円筒におけるすべりの有無、および内部の変形状態の評価も併記する。内部の変形状態については、着色モルタル(図中では黒色)および無着色モルタルによる縞模様の本数およびその分布状態から変形の均一さを定性的に評価した。

表面の目視評価によれば、10min後の試料においては外円筒との接触面においてすべりが発生するものが多く観察された。これは、時間の経過とともに余剰水が型枠表面に移動した結果、もしくは試料のせん断抵抗が増したことによると考えられる。

また、表面部の観察で外円筒表面におけるすべりが認められない場合でも、内部(断面)の観察からは不均一な変形が見られたり、逆に外円筒表面におけるすべりが観察された場合でも内部(断面)では均一な変形が見られるなど、表層部の目視結果と内部の状態は必ずしも一致しないことがわかった。

水セメント比に着目した場合、変形状態に関してはW/C=0.50、0minの試料のみ、他と比べて変形量が少ないように見える。これは水量が多く、粉体量が少ないため、せん断変形が伝達されにくくなるためと考えられる。これに対して10min後では、他のW/Cと同様に試料全体が変形している。これは、初期水和により水和生成物が固体粒子間の空間に析出したため、せん断変形が伝達されやすくなったと考えられる。他の水準においては水セメント比を変化させても大きな差は認められなかった。

図4に、静置時間0minのコンシステンシー曲線を示す。ここでは、せん断ひずみ速度の計算には試料が全断面で均等に変形したと

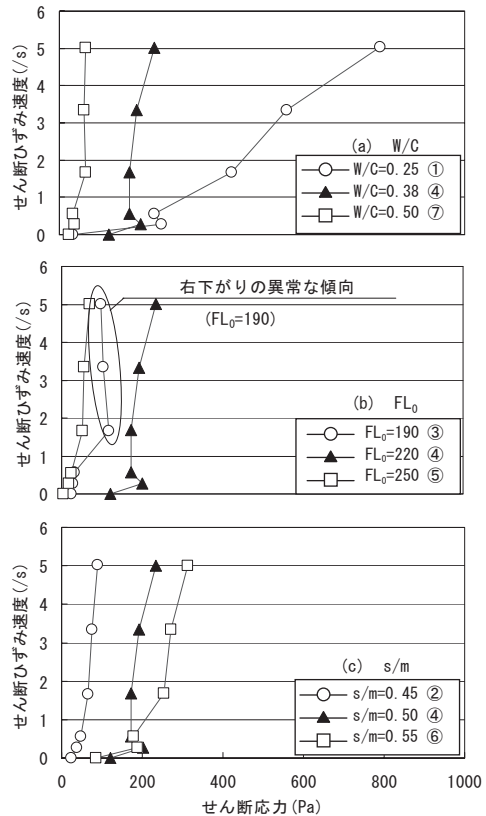


図4 コンシステンシー曲線

仮定している。また、せん断応力の値は、定せん断ひずみ速度で変形させた時の収束値を用いた。静置時間10minの測定結果は、本実験においては外円筒表面におけるすべりが発生しており、 $\dot{\gamma}$ の正確な算定ができないため、測定結果を割愛した。

図4(a)からは、水セメント比が大きいほどコンシステンシー曲線の傾きの逆数である粘性係数（ビンガムモデルを仮定した場合の塑性粘度）が大きくなる傾向が示され、特に水セメント比0.25の時は他のものと比べて著しく大きな値が観測されていることがわかる。

次にフロー値に着目してみると、図4(b)のコンシステンシー曲線の比較から、 $FL_0=190$ では、せん断応力が流動性の大きい $FL_0=220$ より小さくなり、またせん断ひずみ速度が1.7(/s)以上で右下がりとなるなど、異常な結果となっている。この原因としては、表3に示す変形状態から、内円筒近傍で試料内部にすべり面が形成され、均一な変形をしていないことが考えられる。このことから、流動性がある程度以下の硬い試料では、他の試料と異なるすべり面の形成等といったメカニズムが存在する可能性が高い。

細骨材容積比に着目すると、表3からはs/mが小さいものは変形領域が狭くなることわかった。このことから、本実験で用いた調合の範囲では、細骨材粒子の接触により、せん断変形が伝達されていることが推測される。また、図4(c)のコンシステンシー曲線によると細骨材容積比が大きいものほど粘性係数も大きくなっている。

## 5. せん断応力の測定に関する実験結果とその考察

### 5.1 せん断応力の測定結果

図5に、せん断応力と時間の関係を示す。同図(d)には、与えたせん断ひずみ速度の時刻歴も示す。ただし、静置時間10minの測定結果に関しては、外円筒表面ですべりが発生しており、正確な評価ができないため、測定結果を割愛した。

同図より、ほぼすべての試料で、定せん断ひずみ速度下においてせん断応力が変化する傾向が見られた。この原因として考えられるのは、高濃度サスペンションのダイラタンシー<sup>9)</sup>および試料の慣性力である。ここで、本実験条件とは試料の密度および内円筒の直径が異なるものの、既報<sup>12)</sup>において均質粘性体（密度1.0g/cm<sup>3</sup>）を測定した際には、このような傾向が全く現れていないことから、本報ではこれを正・負のダイラタンシーの影響と考えて考察を進める。ただし、現時点では慣性力の影響については不明な点が多く、今後、さらなる検証実験が必要となる。

図5からは、せん断応力が大きいほど定ひずみ速度下におけるせん断応力の変化量が大きくなる傾向が見られ、その変化量は定せん断ひずみ速度で変形させた際の収束値（以下、単に収束値）と比べて無視できないほど大きい。このため、フレッシュモルタルのレオロジー性質の評価には、このせん断応力の変化特性を考慮することが非常に重要と考えられる。

### 5.2 せん断応力の変化量に関する考察

本実験条件では、せん断ひずみ速度の変化量（以下、 $\Delta\dot{\gamma}$ ）を要因としておらず、また定せん断ひずみ速度での変形量（回転量）が360°で一定としているため、せん断応力が収束に至っていない場合も多く、正確な物性値のモデル化はできない。しかし、ここでは上記を踏まえたうえで、 $\Delta\dot{\gamma}$ によるせん断応力度の変化量（以下、 $\Delta\tau$ ）の評価を試みる。

#### 5.2.1 $\Delta\tau$ および $\Delta\dot{\gamma}$ の算出方法

図6および式(1),(2)に $\tau$ および $\dot{\gamma}$ の変化量の算出方法を示す。

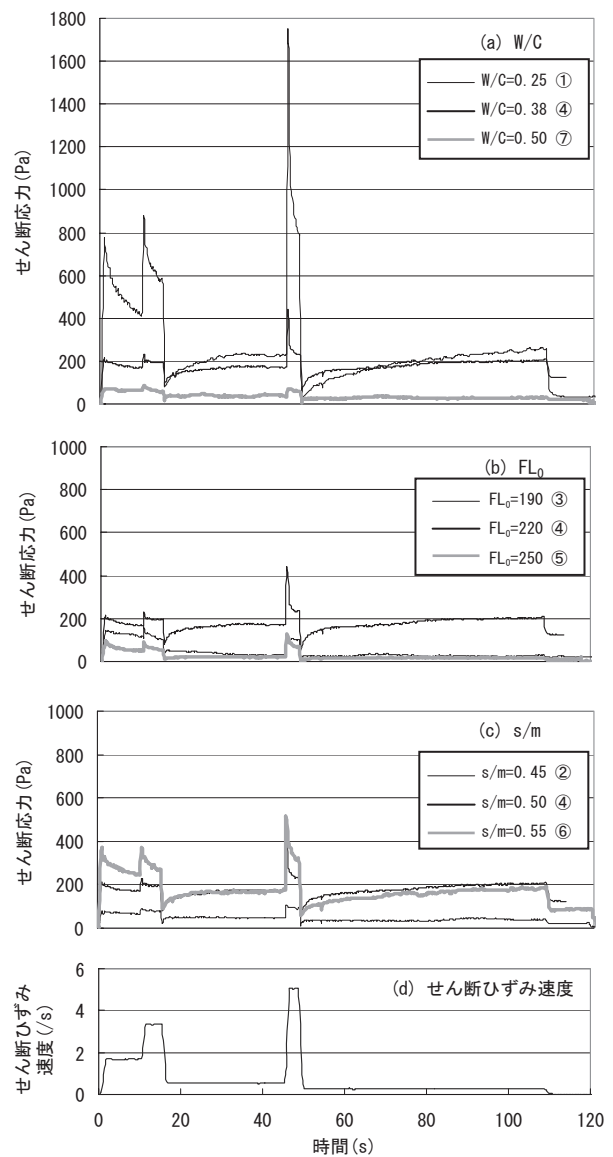


図5 せん断応力およびせん断ひずみ速度の時刻歴

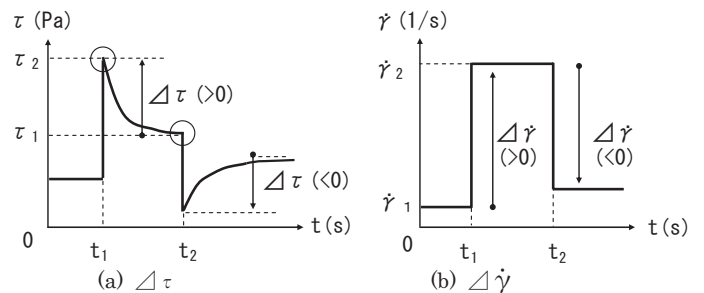


図6  $\Delta\tau$ および $\Delta\dot{\gamma}$ の算出方法

$$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 \quad (1)$$

$$\Delta\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_2 - \dot{\gamma}_1 \quad (2)$$

ここに、 $\tau_2$ :せん断ひずみ速度を変化させた直後の $\tau$ の値(Pa)、 $\tau_1$ : $\tau$ の収束値(Pa)、 $\dot{\gamma}_1$ :変化前の $\dot{\gamma}$  (/s)、 $\dot{\gamma}_2$ :変化後の $\dot{\gamma}$  (/s)

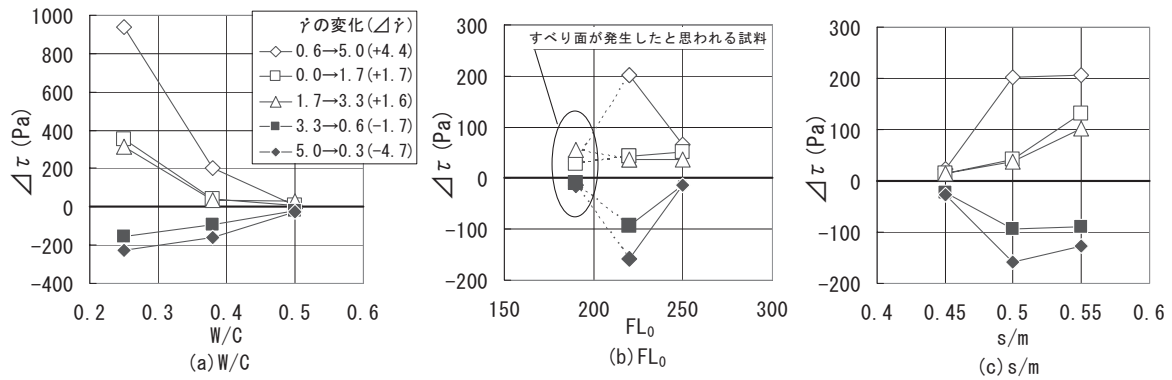


図7 セン断応力と各要因の関係

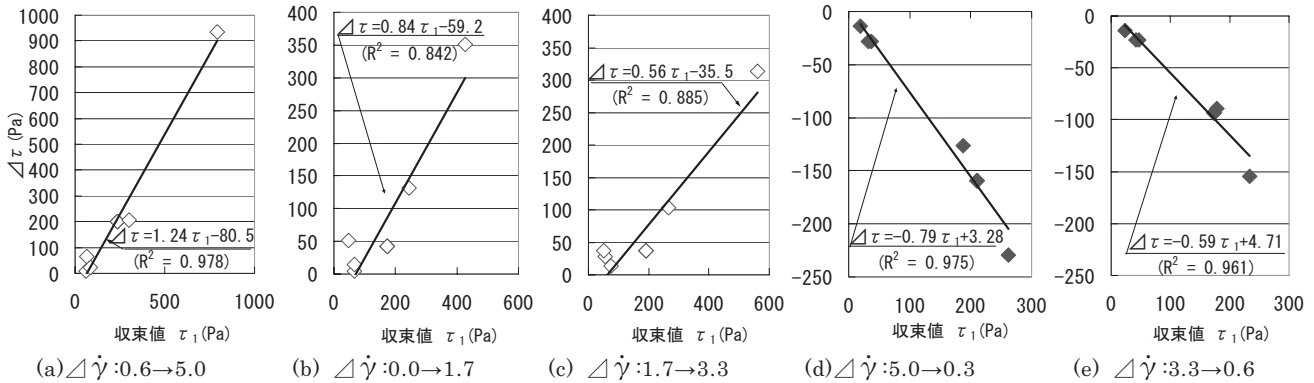


図8  $\Delta\tau$ と収束値の関係

### 5.2.2 調合要因の影響

図7にせん断応力と各調合要因の関係を示す。この結果からは、それぞれの要因ごとに傾向は見られるものの、その全てを含めて一定の傾向をとらえるのは難しい。

### 5.2.3 セン断応力レベルの影響

図8に、 $\Delta\tau$ と収束値 $\tau_1$ の関係を示す。この図より、 $\Delta\dot{\gamma}$ 毎に、要因の違いに関わらず $\Delta\tau$ と収束値には線形の相関関係が見られた。収束値は定常流におけるせん断抵抗の大きさを表しているため、せん断応力が急変しない状態での一般的な試料の硬さを示していると考えられる。このことから、 $\Delta\dot{\gamma}$ が一定であれば $\Delta\tau$ の値は試料の硬さに比例すると考えることができる。

### 5.2.4 $\Delta\tau$ と $\Delta\dot{\gamma}$ の関係

図9に $\Delta\tau$ と $\Delta\dot{\gamma}$ の関係を示す。ここで、内円筒付近においてすべりが発生したと思われる $FL_0=190$ の試料については点線で示した。この図から、 $\Delta\tau$ は $\Delta\dot{\gamma}$ と強い相関があり、特にW/Cを要因とした図(a)に注目すると、両者の関係は $\Delta\dot{\gamma}$ の正・負で傾向が異なることがわかる。すなわち、 $\Delta\dot{\gamma}$ が正の場合には $\Delta\tau$ は正の値をとり、比較的線形に近い増加の傾向が見られる。これに対して $\Delta\dot{\gamma}$ が負の場合には、 $\Delta\tau$ は負の値となり、ある一定値に漸近していく傾向がある。これは、 $\Delta\dot{\gamma}$ が負の場合には負のダイラタンシー（液状化）が発生し、 $\Delta\tau$ の絶対値が収束値 $\tau_1$ を超えない、すなわち $\tau$ の最小値が0以下にはならないためと考えられる。図(b),(c)に示す0打フロー値および細骨材容積比を要因としたグラフにおいても、内

円筒付近でのすべりが確認された $FL_0=190$ の測定結果（点線）以外は、ほぼ同様な傾向が見られる。

以上の結果から、 $\Delta\tau$ と $\Delta\dot{\gamma}$ の関係は試料ごとに1本の曲線で近似できる可能性がある。同関係は、フレッシュコンクリートの打設時、鉄筋間通過時、ポンプ圧送時、振動締め固め時等のせん断ひずみ速度の急変を伴う現象におけるフレッシュコンクリートの複雑な挙動を把握し、予測するための重要な特性の一部となると考えられる。

## 6. まとめ

本論文では、ダイラタンシーの影響を表現できるフレッシュコンクリートのレオロジーモデルの構築を目的として、回転粘度計を用いたフレッシュモルタルのレオロジー性質に関する基礎的な検討を行った。

回転粘度計内部の可視化実験の結果から得られた知見は以下の通りである。

- 1) 測定時の試料の変形状態は非常に複雑であり、試料の状態によって大きく異なる。
- 2) 試料によっては必ずしも均一な変形をしておらず、レオロジー性質を平均的に評価できる条件を満たしていない場合がある。

また、せん断応力の測定結果から得られた知見は以下の通りである。

- 1) フレッシュモルタルのレオロジー性質には、ダイラタンシーに起因したと考えられるせん断応力の変化が大きく影響している。すなわち、せん断ひずみ速度を増加させたときにはせん断応力が一時的に増大し、せん断ひずみ速度を減少させたときにはせん断

応力が一時的に減少する。

- 2) ダイラタンシーに起因すると考えられるせん断応力の変化量は、水セメント比が小さいほど、モルタルフロー値が小さいほど、細骨材容積比が大きいほど、大きくなる。
- 3) せん断ひずみ速度を変化させた場合に、そのときに変化させたせん断ひずみ速度の変化量と、その後の定せん断ひずみ速度下におけるせん断応力の変化量には、強い相関がある。

上記に示した本実験結果は、ある限られた条件下におけるものであり、現時点ではフレッシュコンクリートの詳細なレオロジーモデルを構築する段階にない。しかし、測定された定せん断ひずみ速度下におけるせん断応力の変化特性は、ビンガムモデルを用いた従来の評価が、レオロジー性質の一側面の評価でしかないことを示している。今後は、測定方法および評価軸まで含めた再構築が必要であると考えられる。

一方、実現象との関係としては、間隙通過時の閉塞現象、および加振時の流動化などのメカニズムを定量的に説明するデータとなり得ると考えられるため、今後、さらに広範囲な試料を対象とした実験を行い、検証を進める予定である。

#### 謝辞

本研究費の一部は、平成 19 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 他：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) C. T. Kennedy: The Design of Concrete Mixes, Proceedings of the American Concrete Institute, Vol. 36, pp. 373-400, 1940.
- 3) T. C. Powers: The properties of Fresh Concrete, John Wiley & Sons, Inc., 1968.
- 4) 山田義智、富山潤：セメントペーストの流動曲線予測に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 30, No. 2, 2008. 6
- 5) 李柱国、谷川恭雄、森博嗣：高流動コンクリートのフレッシュ性状の経時変化およびチキソトロピーに関する理論的考察、日本建築学会構造系論文集、No. 558, pp. 15-22, 2002. 8
- 6) 服部健一、和泉嘉一：セメントペースト及びコンクリートの粘度についての 2, 3 の理論的考察、セメント・コンクリート論文集、No. 51, pp. 412-417, 1997. 12
- 7) 李柱国、大久保孝昭、谷川恭雄、森博嗣：フレッシュコンクリートの粘塑性せん断変形挙動に関する理論的考察、日本建築学会構造系論文集、No. 564, pp. 1-8, 2003. 2
- 8) 三島直生、谷川恭雄、森博嗣、黒川善幸、寺田謙一、服部俊範：せん断ボックス試験による高濃度サスペンションのレオロジー性質に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No. 528, 13-19, 2000. 2
- 9) 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レオロジー性質の評価手法に関する基礎的研究 その 1 実験概

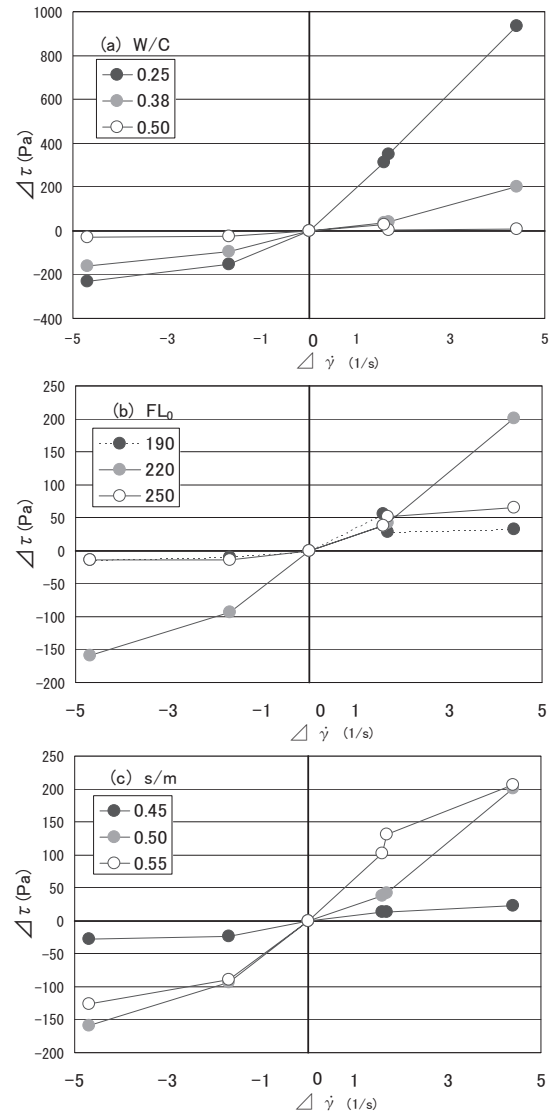


図 9  $\Delta\tau$  と  $\Delta\dot{\gamma}$  の関係

- 要及び変形状態、第 62 回セメント技術大会講演要旨、Vol. 62, pp274-275, 2008. 5
- 10) 大村修太郎、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レオロジー性質の評価手法に関する基礎的研究 その 2 ダイラタンシー特性の評価、第 62 回セメント技術大会講演要旨、Vol. 62, pp276-277, 2008. 5
  - 11) 大村修太郎、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評価方法に関する考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1, pp. 725-726, 2008. 7
  - 12) 三島直生、畑中重光、大村修太郎：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、コンクリート工学年次論文集、Vol. 29, No. 2, pp. 37-42, 2007. 6

(2008年9月8日原稿受理, 2009年2月25日採用決定)