

論文 回転粘度計を用いたフレッシュモルタルのせん断変形時における間隙水圧の変化に関する実験的研究

大村 修太郎*1・三島 直生*2・畑中 重光*3

要旨: 回転粘度計を用いてフレッシュモルタルのレオロジー性質を測定した既報の結果から、ダイラタンシーに起因すると考えられる定せん断ひずみ速度下においてせん断応力が変化する現象が確認された。これに対して本研究では、フレッシュモルタルの間隙水圧も同時に測定することで、せん断応力のオーバーシュート現象を含めた流動メカニズムの解明を試みた。その結果、せん断応力の変化に対応した間隙水圧の変化が測定され、フレッシュモルタルのレオロジー性質に対して、ダイラタンシーが大きく影響していることが明らかとなった。

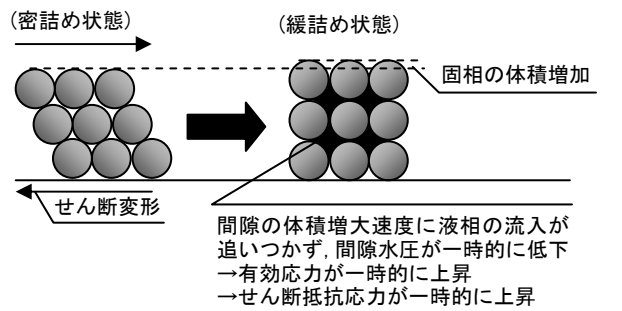
キーワード: フレッシュモルタル, レオロジー, 回転粘度計, ダイラタンシー, 間隙水圧

1. はじめに

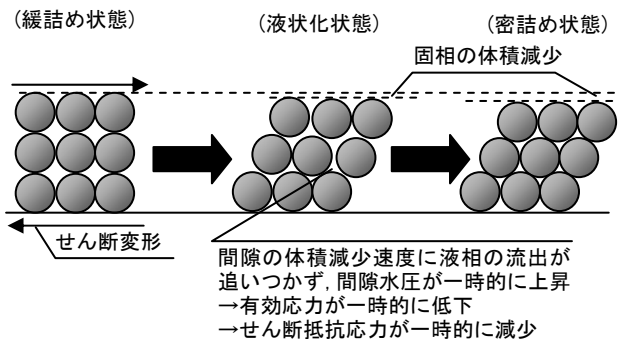
筆者らは、フレッシュコンクリートのレオロジー性質の把握およびモデル化に向けて、既報¹⁾において、フレッシュモルタルを用いた回転粘度計の測定結果から、せん断ひずみ速度が急変した際に、せん断応力が急激に増加もしくは減少する特性があることを示した。このような現象は一般に応力のオーバーシュート現象と呼ばれ、高分子材料の粘度測定において多くの事例が報告されており、その原因としては、高分子のからみ合いによるものなどと説明されている²⁾。これに対して、フレッシュモルタルは、その組成メカニズムの違いから高分子材料のメカニズムとは全く異なると考え、既報¹⁾では、高濃度サスペンション特有のダイラタンシーの影響による可能性があると報告した。

図-1にダイラタンシーの概要を示す。間隙を非圧縮性の液体で飽和されたサスペンションでは、試料のせん断変形によって体積変化が発生した際に、間隙水圧が大きく変動し、これが有効応力を変化させ、せん断抵抗応力が変化する³⁾。このため、粉粒体や液体と比べて非常に複雑な挙動を呈するものと考えられ、従来のコンシステンシー曲線による評価では、その流動性を十分に評価できない⁴⁾。フレッシュコンクリートの流動性を把握するためには、この挙動を適切に評価する必要があり、そのメカニズムの解明にあたっては、試料内部の間隙水圧の動きが重要な要素であると考えられる。また、せん断応力の変化に対応した間隙水圧の変化が測定されれば、これまでに測定されている応力のオーバーシュート現象の原因としてダイラタンシーの影響が大きなものであると示すことが出来る。

既往の研究の中には、せん断ボックス試験機を用いて



(a) 正のダイラタンシー



(b) 負のダイラタンシー

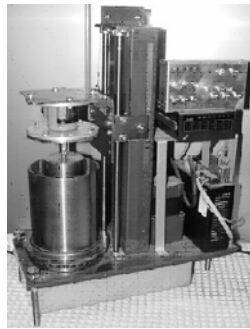
図-1 ダイラタンシーによるせん断抵抗応力の変化のメカニズム

せん断応力、間隙水圧、側圧を計測し、それらの値の対応関係とクーロンモデルから試料の粘着力と内部摩擦係数を定量化する試みがなされている⁵⁾。しかし、応力のオーバーシュート現象やせん断ひずみ速度の急激な変化に注目した議論はなされていない。その他、数値解析を用いて間隙水圧の挙動からせん断応力の挙動を推定しようという試みもなされている⁶⁾が、その測定自体の困難

*1 旭化成建材(株) 修士(工学) (正会員)

*2 三重大学大学院 工学研究科 助教 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)



<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：φ50×100(mm) (すべり止め含まず)
 測定回転数：1, 2, 6, 12, 18(rpm)
 出力：トルク, 外円筒の回転角度, 試料内部の間隙水圧
 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°

(a) 外観および仕様

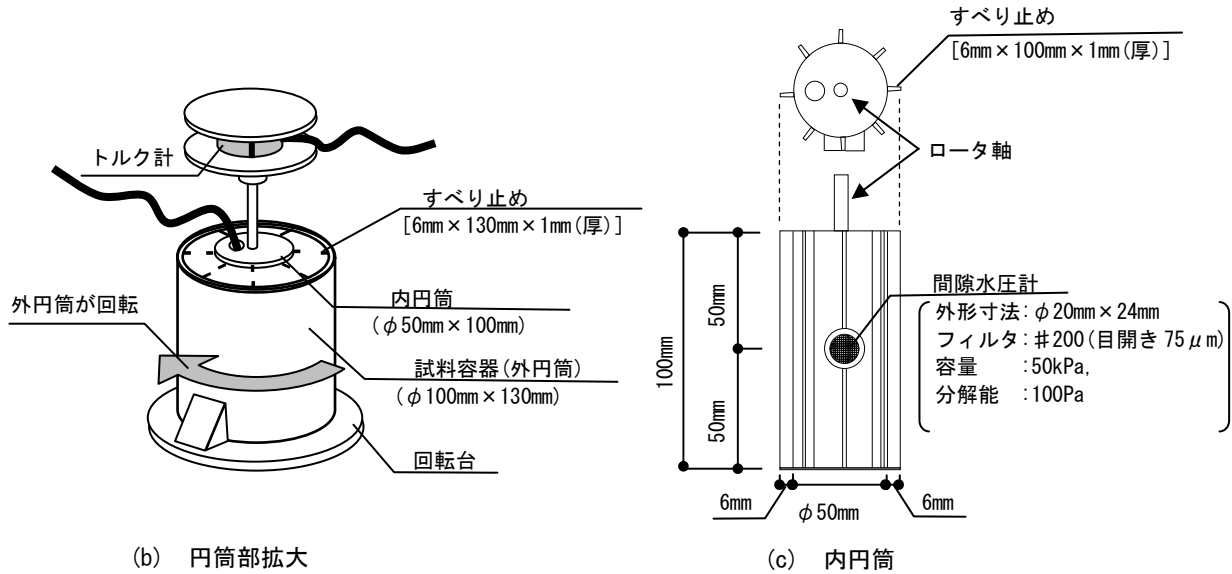


図-2 測定装置概要

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	0.27, 0.30
0打モルタルフロー値	170, 200, 230

[註] _ : 主たる条件

表-2 モルタルの調合

W/C	s/m	単位置量 (g/l)			SP/C (%)	目標FL ₀	実測FL ₀	Air (%)
		W	C	S				
0.27	0.50	230	851	1275	0.70	170	153	3.6
					0.67	200	192	3.9
					0.71	230	243	3.6
0.30	0.50	243	810	1275	0.30	200	185	6.3

[註] SP : 高性能AE減水剤 FL₀ : 0打モルタルフロー値

さから、間隙水圧に着目した研究の数は極めて少ない⁷⁾。
⁸⁾

本報では、以上の点を踏まえて、フレッシュモルタルのせん断抵抗応力の測定における応力のオーバーシュート現象とダイラタンシーとの関連を調べることを目的に、試料内部の間隙水圧の変化に着目して実験を行った。

2. 実験概要

2.1 フレッシュモルタルの間隙水圧測定方法

筆者らは、回転粘度計に使用する内円筒側面に間隙水圧計を設置することで、試料にせん断変形を与えた際の、内部の間隙水圧の変化を直接測定する事を試みた。

図-2に、今回の実験で使用した測定装置の概要を示す。測定には、モルタル用に試作した外円筒回転型二重円筒式回転粘度計を用いた。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 75 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すべり止めの外側と一致するように内円筒に固定した[図-2 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が 5ms で測定した。また、間隙水圧の 0 点は内円筒を試料の中に設置した時点とした。

2.2 実験要因および実験方法

実験の要因と水準を表-1に、試料の調査表を表-2に示す。試料は高流動モルタルとし、高性能 AE 減水剤添加率を調整することで0打モルタルフロー値を3水準に、変化させた。空気量はモルタル用エアメータを用いて測定した。また、モルタル中の空気泡は圧縮性であり、間隙水圧の変動を緩和してしまうことが予想されるため、本実験では間隙水圧の変動を明確に捉えることを優先して、調合時に消泡剤を添加し、空気量を表-2に示すように小さな値とした。ただし現時点では空気量が間隙水圧の変動に及ぼす影響については不明であり、今後、一般のコンクリートを含めてその変形特性を論じるためには、間隙水圧の変動に及ぼす空気量の影響を把握することが不可欠となる。セメントは市販の普通ポルトランドセメントを用い、水は水道水、細骨材は町屋川産の川砂、高性能 AE 減水剤はポリカルボン酸系の高強度用のものを用いた。

せん断応力の測定時には、せん断ひずみ速度の範囲は、装置の限界から 0.0~7.5(s)とし、過去の経験上、せん断ひずみ速度の小さい範囲で測定値が安定しないことを考慮して、0.0~2.5(s)の範囲でせん断ひずみ速度の水準を多くすることとした。また、測定順は経時変化の影響を除外するためにランダムとする目的で図-3に示すように 2.55→4.95→0.90→7.50→0.45→0.00(s)の順に連続して6水準に変化させた。

変形量は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。

3. 実験結果とその考察

3.1 せん断応力および間隙水圧の変化挙動

図-3に、試料のせん断応力と間隙水圧の変化の時刻歴を示す。

各図の上段に示したせん断応力の測定結果によれば、既報¹⁾で見られたのと同様な、せん断ひずみ速度の変化

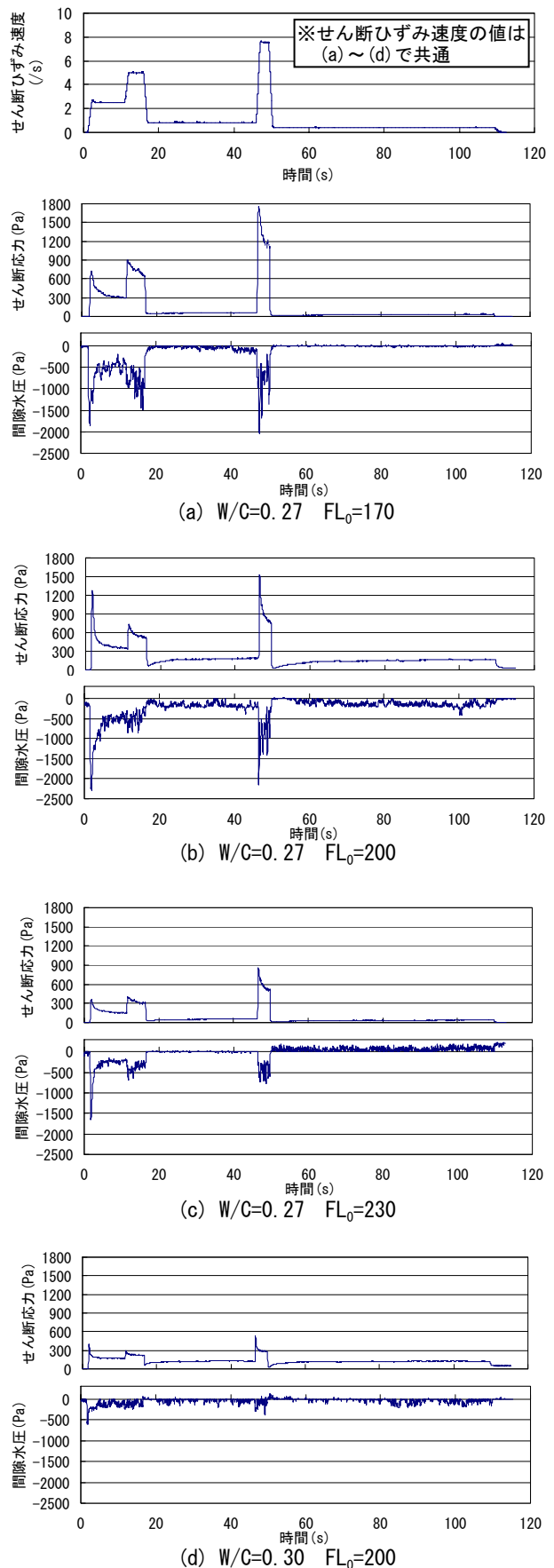


図-3 せん断応力と間隙水圧の時刻歴

時点における応力のオーバーシュートが測定されている。

また、せん断応力と間隙水圧の測定結果の比較からは、バラツキはあるものの、せん断応力の増大時には間隙水圧が減少し、せん断応力が減少したときには間隙水圧が増大しているという明確な対応関係が見られる。

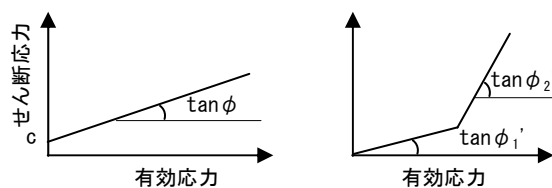
以上の結果は、ダイラタンシーが発生した際、体積の増減が生じることにより試料内部の間隙水圧の変動が生じることから、フレッシュモルタルの変形には、ダイラタンシーが非常に大きく影響していることを示しており、応力のオーバーシュートについてもダイラタンシーに起因した現象であると考えられる。

各要因の影響としては、まず、0打フロー値の違いに着目すると、図(a), (b), (c)の比較からは、0打フロー値が大きいほどせん断応力と間隙水圧の対応関係が良好になる。これは、流動性の高いものの方が変形が均一となるためと考えられる。なお、0打フロー値が170の実験結果において、せん断応力の値がフロー値が200の試料と比べて低く計測されている。現時点ではこの原因は不明であるが、過去の回転粘度計の試料内部の変形を可視化した実験結果⁹⁾からは、フロー値の小さい試料(文献9)ではフロー値190では、流動性が低いために内円筒近傍の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という結果が得られており、今回の実験においても、すべり面が生じたことによってせん断応力が低く計測されている可能性が考えられる。

また、W/Cの違いに関しては、図(b), (d)の比較から、W/Cが大きい方が間隙水圧の変化が小さくなっている。両者の比較については、せん断応力の違いによる影響も考えられるが、せん断応力のレベルが比較的近い図(c)との比較からもその傾向は明らかである。これは、W/Cが大きくなると、サスペンション濃度が低くなり、固体粒子間の距離が遠のき、その結果としてダイラタンシーの影響が薄れるためと考えられる。

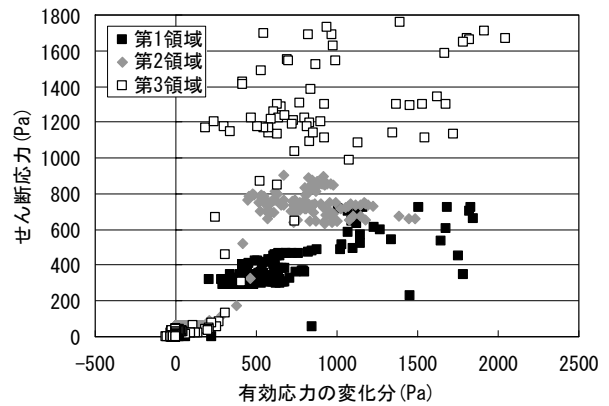
この結果から、高濃度サスペンション特有のダイラタンシーの影響は水セメント比が小さく、また、0打モルタルフロー値のある程度以上大きな試料においてははっきりと現れるということが出来る。

また、測定開始直後の間隙水圧の変化は、それ以降の

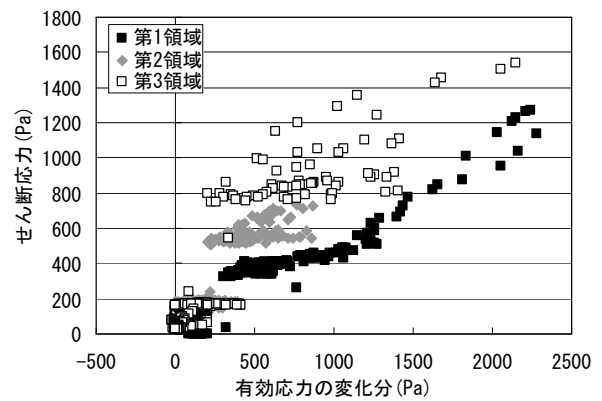


(a) 一般的な土の破壊規準 (b) 飽和砂の動的な破壊規準³⁾
(クーロンの破壊規準¹⁰⁾)

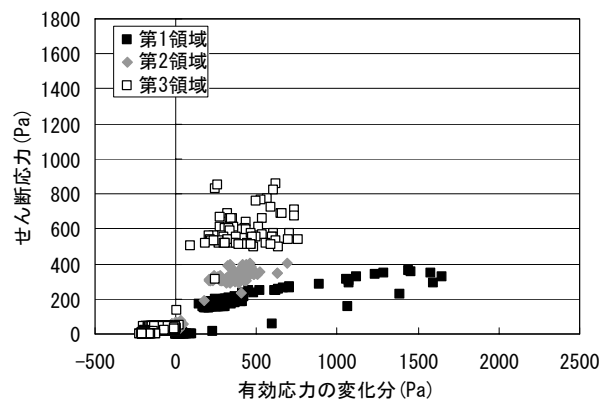
図-4 土および飽和砂の破壊規準



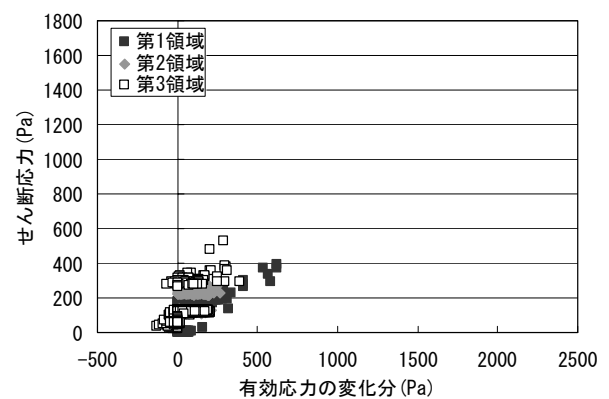
(a) W/C=0.27 FL₀=170



(b) W/C=0.27 FL₀=200



(c) W/C=0.27 FL₀=230



(d) W/C=0.30 FL₀=200

図-5 せん断応力と間隙水圧による有効応力の変化分の関係

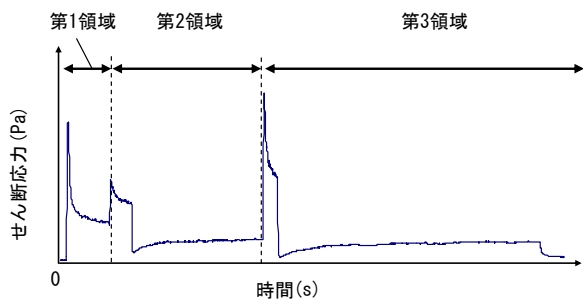


図-6 時間経過に基づく領域の分割

値と比べて非常に大きなものとなっている。これは試料が静置した状態から急に变形を生じる際には、流動している試料のせん断ひずみ速度に変化が生じる状況とは固体粒子の配列などが異なるためと考えられる。

3.2 せん断応力と間隙水圧による有効応力の変化分の関係

サスペンションの变形抵抗性を考える際に、土質力学などの分野では有効応力による評価が一般的に行われる。全応力(側圧)、有効応力および間隙水圧の関係は、以下のように示される。

$$(\text{全応力}) = (\text{有効応力}) + (\text{間隙水圧})$$

ここで、全応力を一定とした場合には、間隙水圧の変化は、そのまま符号を変えて有効応力の変化と考えることができる。

土質の分野において、静的な土の破壊規準(せん断応力と有効応力の関係)は、図-4(a)に示すようなクーロンの破壊規準として得られるとされている¹⁰⁾。これに対して、本研究で対象としているようなサスペンションの流動下における、いわゆる動的な破壊規準の測定結果は極めて少ない。既報³⁾においては、せん断ボックス試験を用いて測定した飽和砂の動的な破壊規準として、せん断ひずみ速度によらず、図-4(b)に示すような2直線で示されるという結果が得られている。

図-5に、本実験から得られた間隙水圧による有効応力の変化分とせん断応力の関係を示す。ただし、同図においては図-6に示す様に、時間経過に基づき3つの領域に分けて示す。

同図より、全ての試料において、時間が経過するとともに、せん断応力の測定値が上方へシフトする傾向が見られる。この原因については現時点では不明な点が多いが、現状で無視されている側圧(全応力)の影響によるものと考えられる。ただし、側圧が時間とともに増大する結果とならなければ、図-5の傾向が説明できない。これに対し、本実験で用いているのが高流動なモルタルであり、強制変形を与え続けてトルクの測定を行っていることなどを考慮すると、試料の材料分離の影響が考えられ

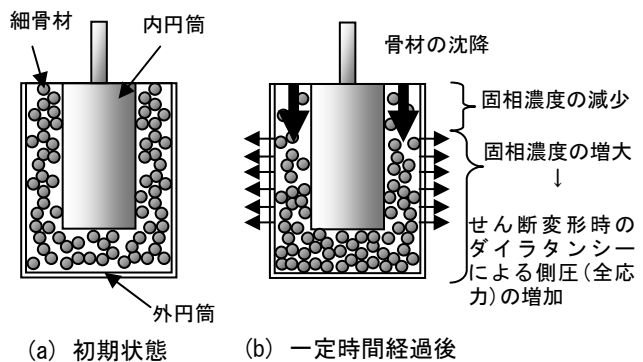


図-7 時間経過後の全応力増加メカニズム予想図

る。すなわち、図-7に示すように、時間経過にしたがい骨材の沈降が生じ、それにより試料下部のサスペンション濃度が増大し、ダイラタンシーによる体積の増加傾向が大きくなり側圧(全応力)が増加したものと考えられる。

以上の結果から、今後は圧力計を用いて試料の側圧(全応力)も計測することで、より正確な計測を行うことが可能と考えられる。

4. まとめ

せん断応力が変化する場合の間隙水圧の変化挙動に関する実験を行った。その結果、せん断応力の変動に対応した間隙水圧の変化が測定された。このことから、フレッシュモルタルの变形挙動には、ダイラタンシーが非常に大きく影響しており、応力のオーバーシュートについても主にダイラタンシーに起因する現象であると推察される。

今後の課題としては、側圧(全応力)を計測することで有効応力を算定し、せん断応力との関係から内部摩擦係数や粘着力等の係数を明らかにできると考えられる。これは、フレッシュ状態にあるモルタルおよびコンクリートの流動メカニズムの把握やレオロジー性質の定量化に向けた最も基本的なデータとなり得る。また、側圧(全応力)の変化から材料分離の進行度なども定量的に評価できる可能性があり、継続して研究を進める予定である。

謝辞

本研究に用いた化学混和剤は竹本油脂株式会社より提供して頂いた。

本研究費の一部は、三重大学若手研究プロジェクトによった。付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 大村修太朗, 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(中国)学術講演梗概集, A-1, pp.725-726, 2008.9

- 2) 尾崎邦宏：高分子の非線形レオロジー，日本レオロジー学会誌，Vol.29，2001
- 3) 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
- 4) 三島直生，畑中重光，大村修太郎：回転粘度計を用いたフレッシュモルタルのレオロジー定数測定方法に関する研究，第61回セメント技術大会講演要旨，Vol.61，pp84-85，2007
- 5) 李建哲，谷川恭雄，森博嗣，黒川善幸，三島直生：フレッシュコンクリートのせん断変形抵抗性に及ぼす間隙水圧の影響に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No.588，7-12，2005.2
- 6) 比嘉盛嗣，谷川恭雄，森博嗣，黒川善幸，李建哲，藤本寿志：フレッシュコンクリートのせん断ひずみ依存性に及ぼす間隙水圧の影響に関する解析的研究，日本建築学会大会(東海)学術講演梗概集，A-1，pp.477-478，2003.9
- 7) 三島直生，谷川恭雄，森博嗣，黒川善幸：フレッシュモルタルのレオロジー性質に及ぼすセメント粒子の凝集および液状化の影響に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No.543，9-13，2001.5
- 8) 張文博，李柱国，稲井栄一：フレッシュコンクリートの間隙水圧に関する実験的考察，日本建築学会大会(中国)学術講演梗概集，A-1，pp.715-716，2008.9
- 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
- 10) 石井義明，福本武明，竹下貞雄，西原晃，芹生正己，久武勝保，桑山忠，畠山直隆：最新土質力学，朝倉書店，pp94-96，1992