

論文 フレッシュコンクリートの応力制御型レオロジー試験法の開発

李 柱国*¹・李 潔勇*²・飯高 稔*³

要旨：本研究では、応力制御型レオロジー試験装置を開発し、フレッシュコンクリートのせん断破壊状態までの変形性質の評価および破壊限界応力と限界ひずみの測定への適用性を検証した。また、実験結果に与える実験条件の影響を検討し、実験結果が載荷速度と試料の高さに依存することを明らかにした。載荷速度が大きいほど、または流動性が高い試料の場合においては試料が高いほど、せん断破壊限界応力と限界ひずみの測定値は小さい。

キーワード：フレッシュコンクリート、レオロジー、応力制御試験法、自由変形性質、せん断破壊限界応力

1. はじめに

近年、コンクリートのフレッシュ性状が混和材料や再生材料などの使用によって複雑化・多様化しており、スランプやスランプフローによって正確に評価できないケースが少なくない。また、ポンプ圧送の高度・距離の増大および RC 部材の鉄筋配置の高密度化に伴って、コンクリートの打込みの難度が増してきている。このため、フレッシュコンクリートの品質の評価、設定および適合性判定は、今までの経験則や仕様書では対応しにくくなっている。そこで、施工方法と部材条件に基づいてフレッシュコンクリートの品質を設定・判定する施工設計法の確立が極めて重要であると考えられる。

谷川・森が 1988 年に数値シミュレーションに基づいた施工設計法（ワーカビリティ判定法）の概念を提唱した¹⁾。この方法は、材料性質の把握と解析手法という 2 本の柱を軸とするものであり、実大施工実験に比べ、時間、費用等が節約できるため、国際的にも認められた。現在、流動シミュレーション手法は幾つか提案されているが、解析に用いられた構成モデルは、ビンガムモデルまたはその改良型である。

本来、粘性流体に適用するビンガムモデルの最大の特徴として、せん断応力が降伏値を超えるまで、せん断ひずみ速度はゼロとされている。つまり、降伏値より小さい応力を加えれば、変形が生じない。しかし、実際に、小さいせん断応力を加えても、変形が発生する²⁾。つまり、ビンガムモデルは、フレッシュコンクリートの低速または小変形挙動を表すことができない。降伏値は、粘性流体に照らして想定するものといえる。

降伏値が存在するとすると、降伏時点に材料が急に挙動する数値流動解析上の不具合が生じる。この問題を回避するために、通常、降伏までの塑性粘度をかなり大きく設定する手法が用いられている³⁾。

一方、レオロジー的性質を評価するためのビンガム定

数—降伏値と塑性粘度の測定試験は、従来均質な液体を対象に開発された二重円筒型回転粘度計および回転翼型粘度計などを用いてひずみ速度制御によって行われる。これらの測定法は以下の問題があると思われる。

① フレッシュコンクリートの流動曲線は直線ではないため、測定に用いたせん断速度の範囲によって求められたビンガム定数は異なる⁴⁾。そのため、異なる試験の結果を比較できない。

② 小変形挙動と極低速領域の流動挙動を測定できない。フレッシュコンクリートの骨材沈降分離と流動閉塞現象は、小変形と低速領域の変形・流動挙動と関連するだろうと考えられる。これらの現象を解明と予測するために、小変形と低速領域の挙動の測定が必要である。

③ 強制変形下のせん断抵抗を測定するものであるため、測定結果は圧送や打込み時の自重や圧力による自由変形下の挙動を反映できるわけではない。外力作用下の自由変形・流動挙動を解明し、モデル化するためには、応力制御型試験法の開発が必要であると考えられる。

筆者らは、この背景を踏まえて、小型せん断ボックスを用いて、応力制御法によってフレッシュコンクリートの小変形・低速変形際の挙動を考察し、せん断変形モデルを提案した⁵⁾。しかし、小型せん断ボックスのせん断ひずみの測定範囲は 1.0 以内に限られる。また、試料の流動性が低い場合、せん断過程では回転加力板の圧縮による圧密と垂直方向の変形が生じるため、単純なせん断試験にならない。そのため、フレッシュコンクリートの大变形状態の性状も測定できる応力制御法の試験装置の開発およびせん断破壊限界応力、限界ひずみおよび限界ひずみ速度の影響要因の考察は残された課題である。

本研究では、応力制御型リングせん断試験装置を試作し、試験結果に与える載荷速度と試料のせん断層厚さの影響を考察する。また、流動性が異なるモルタルとフレッシュコンクリートのせん断実験を行い、変形・流動特性の測定を試みる。

*1 山口大学大学院 理工学研究科 情報・デザイン工学系専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

*2 山口大学大学院 理工学研究科 情報・デザイン工学系専攻 大学院生 工修

*3 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 技術スタッフ

2. 試験装置

試作した応力制御型リングせん断試験装置を図1(a)に示す。この装置は、上下円筒と羽根、エアモーター、せん断荷重と回転距離の測定システム、振動棒などで構成される。上下円筒は、内径が340mmの硬質塩ビ管で作られ、接合部の3mmの隙間はモヘアシールで充填された。

羽根は、幅と厚さがそれぞれ30mmと3mmの鉄板を放射状に配置したものである(図1(b)参照)。下円筒と下羽根は、エアモーターの駆動によって回転するが、上円筒が固定される。フリーな上羽根は、上下位置の調節ができ、その中空軸に固定したアルミフレームが荷重計にぶつかる。上部羽根と上部円筒内壁の間における5mmの隙間に試料が入らないように、羽根の外周にモヘアシールを貼り付けておいた。

試料を振動によって密実に充填し、リングせん断の中心不動部をつくるために、上部羽根の中空軸を通して、直径が28mmである振動棒を試料円筒の中心に挿入した。振動棒は、上下部羽根と下部円筒と接触させない。上羽根を埋める程度で試料を入れて、自己充填できない試料の場合に、振動棒で分離しないように振動をかけて密実に充填させる。また、振動下のせん断挙動を考察する場合には、振動棒によって試料に振動を加えながら、測定を行う。

エアモーターは下円筒と下羽根を駆動すると、両羽根の間の試料はせん断される。空気圧を調整して、モーターの回転トルクは、ゼロから増大する。つまり、せん断力を制御して、試料にリングせん断変形を生じさせる。半径方向のせん断変形とせん断応力は、円周位置によって異なり、図1(c)に示すように、振動棒に近いほど小さく、直線分布であると考えられる⁹⁾。本研究では、振動棒と円筒内壁の中間位置(図1(c)中の $r/2$ 位置)におけるせん断ひずみとせん断応力をそれぞれ平均せん断ひずみ(γ_m)と平均せん断応力(τ_m)と呼び、両者の関係に主眼を置いて試料のレオロジー性質を表現・考察することとした。

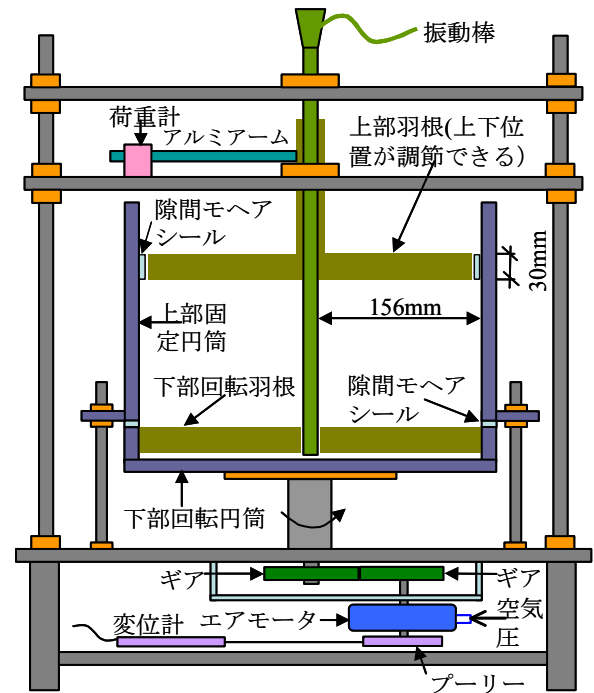
ギア比は1:1であるため、プーリーの回転数は、下円筒の回転数と同じである。変位計で測ったプーリー(直径: $D=130\text{mm}$)の回転距離(s , mm)によって、下部羽根の回転数(= $s/\pi D$)を計算し、せん断面の中間位置($R=92\text{mm}$)の変位(= $2\pi R \cdot s/\pi D=1.415s$)を算出して、下部羽根位置のせん断面の γ_m は、式(1)によって求められる。さらに、単位時間における γ_m の変化量から平均せん断ひずみ速度($\dot{\gamma}_m$)を算出する。

$$\gamma_m = 1.415s/h \quad (1)$$

ここに、 h : 試料の高さ(上下羽根間の距離, mm)

また、トルクを等しくして、荷重計で検出したせん断荷重(F , N)を中間位置のせん断荷重(= $F \cdot L \cdot R=2.446F$, N)を換算する。さらに、 τ_m は、式(2)に示すように中間位置のせん断荷重と試料のせん断面積($A=0.09\text{m}^2$)の比によって算出される。

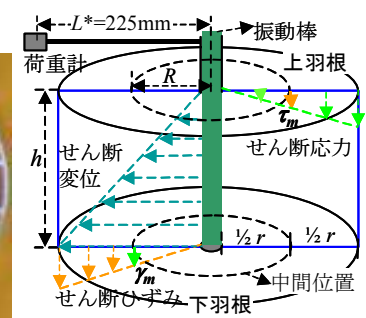
$$\tau_m = 27.2F \quad (\text{Pa}) \quad (2)$$



(a) 装置全体のイメージ



(b) 羽根



(c) せん断ひずみとせん断応力の分布

図1 荷重制御型リングせん断試験装置

表1 モルタルの調査表

Series	M1	M2	M3
W/C (%)	40	40	40
S/C	2.50	2.75	3.00
S_p (C×%)	0.75	1.25	0.50
フロー値	175	165	120

注: W/C: 水セメント比, S/C: 砂-セメント質量比。

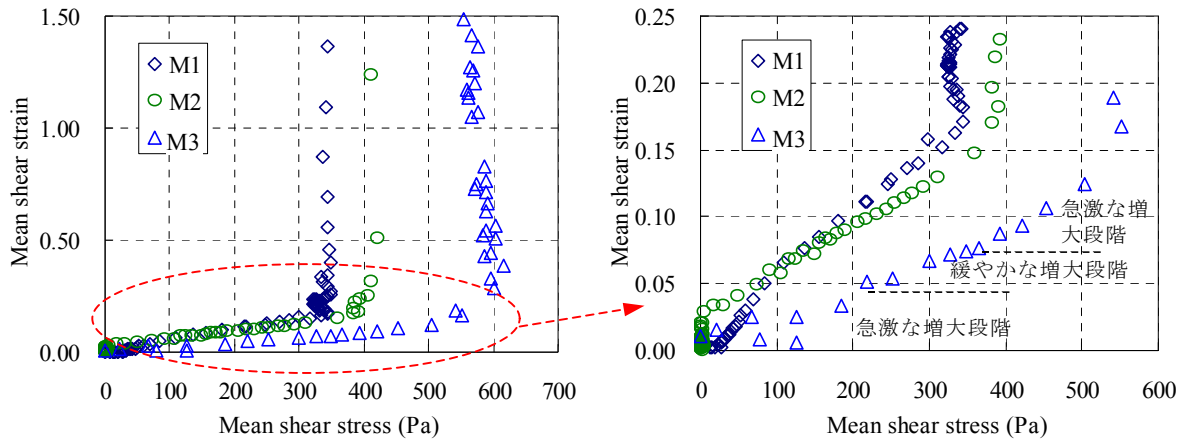
表2 コンクリートの調査表

Series	W/C (%)	S/a (%)	質量 (kg/m ³)					コンシステンシー		
			W	C	S	G	S_p (C×%)	SL (cm)	Sf (mm)	T_{50} (s)
C1	45	48.7	180	400	812	887	2.00	-	660	4.40
C2	50	45.1	175	350	775	981	2.00	-	540	20.0
C3	50	51.2	175	350	881	873	1.50	24.0	-	-
C4	50	43.5	175	350	752	1008	0.50	20.0	-	-

注: W/C: 水セメント比, S/a: 細骨材率, W, C, S, G, S_p : それぞれ水, セメント, 海砂, 碎石, 高性能 AE 減水剤, SL: スランプ, T_{50} : 50cm フロー時間, Sf: スランプフロー

表3 骨材の物理性質

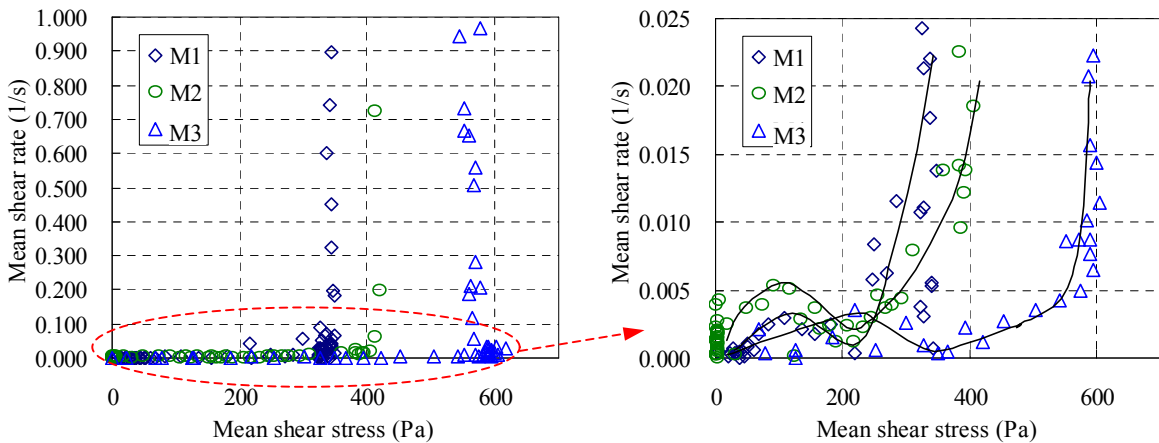
骨材	種類	最大寸法 (mm)	実積率 (%)	粗粒率	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)
粗骨材	碎石	19	57.7	-	2.69	0.84	1537
細骨材	海砂	5	64.9	2.57	2.59	1.60	1660



(a) 全せん断ひずみ-応力関係曲線

(b) 小せん断ひずみ範囲の関係曲線

図2 フレッシュモルタルの $\gamma_m - \tau_m$ 関係曲線 (試料高さ: 50mm, 荷重速度: 5N/s)



(a) 全せん断ひずみ速度-応力関係曲線

(b) 低せん断速度範囲の関係曲線

図3 フレッシュモルタルの $\dot{\gamma}_m - \tau_m$ 関係曲線 (試料高さ: 50mm, 荷重速度: 5N/s)

3. セメント系材料のフレッシュ時のせん断変形特性

本研究で開発した応力制御型リングせん断試験装置を用いて、フレッシュモルタルとフレッシュコンクリートの静的せん断変形特性を考察した。試料の充填に振動棒を使ったが、測定中に振動を加えなかった。

3.1 試料の調査

用いたモルタルとコンクリート試料の調査を表1と表2に示す。流動性の高低順は、それぞれ M1, M2, M3 と C1, C2, C4 である。普通ポルトランドセメントと遅延型高性能 AE 減水材を使用した。用いた砕石と海砂の物理性質を表3に示す。

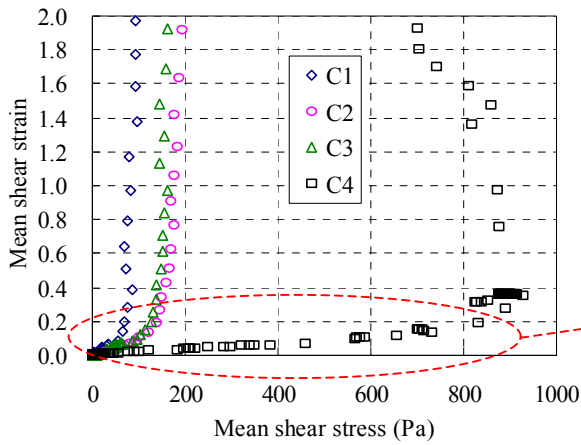
3.2 実験結果および考察

図2～図5に、それぞれフレッシュモルタルとフレッシュコンクリートの $\gamma_m - \tau_m$ 関係および $\dot{\gamma}_m - \tau_m$ 関係を示す。これらの図に示すように、セメント系材料のフレッシュ時の平均せん断ひずみは、せん断応力の増加に伴って、最初に急激に増大したが、ある値に達すると、緩やかに増大する傾向が見られた。これは、それぞれサスペンション体としての流体特性が顕著である段階と、粒子移動によって内

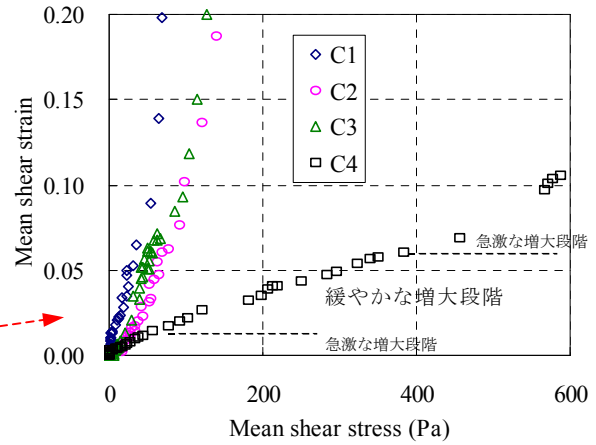
部組織が強化(噛み合いの程度が大きくなる)される粘弾塑性段階(ひずみ硬化段階)における変形挙動であると考えられる⁵⁾。 γ_m は、緩慢に増大した後、再度急激に大きくなり、せん断荷重が同じであっても急上昇することがわかった。これは、せん断破壊状態の変形挙動であると思われる⁵⁾。粘弾塑性段階では粒子の噛み合い程度が大きくなるが、せん断応力のピーク値(せん断破壊限界応力)に達すると、粒子の噛み合いが崩れていき、せん断荷重が増えずに、粒子の移動によるひずみは増大していく。

一方、平均せん断ひずみ速度は、せん断応力の増大に伴って、最初に増大するが、ピーク値を超えると、逆に減小する。せん断応力がさらに増大すると、せん断速度は急に増加する傾向が見られた。これらは、それぞれサスペンション状態、粘弾塑性状態およびせん断破壊状態の挙動であると思われる。

また、これらの図によって、せん断破壊限界応力と限界ひずみは、硬い試料のほうが大きいことがわかった。しかし、せん断破壊限界ひずみ速度は、非常に小さく、試料の流動性の影響がはっきり見られなかった。

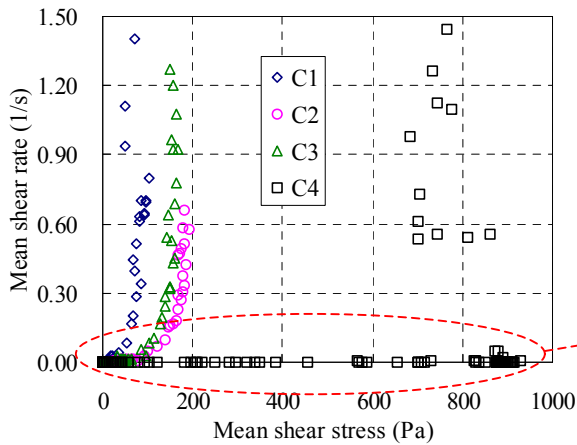


(a) 全せん断ひずみー応力関係曲線

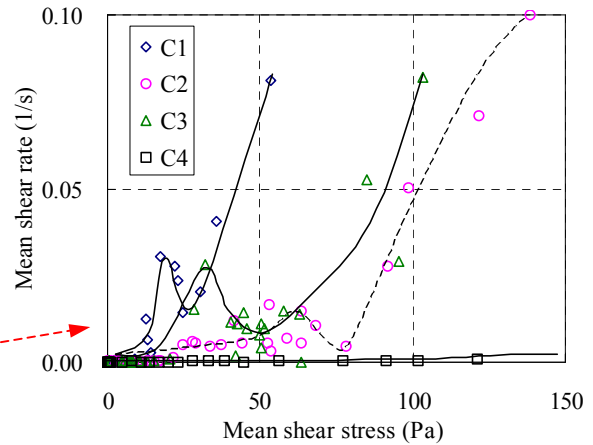


(b) 小せん断ひずみ範囲の関係曲線

図4 フレッシュコンクリートの $\gamma_m - \tau_m$ 関係曲線 (試料高さ: 100mm, 载荷速度: 5N/s)



(a) 全せん断ひずみ速度ー応力関係曲線



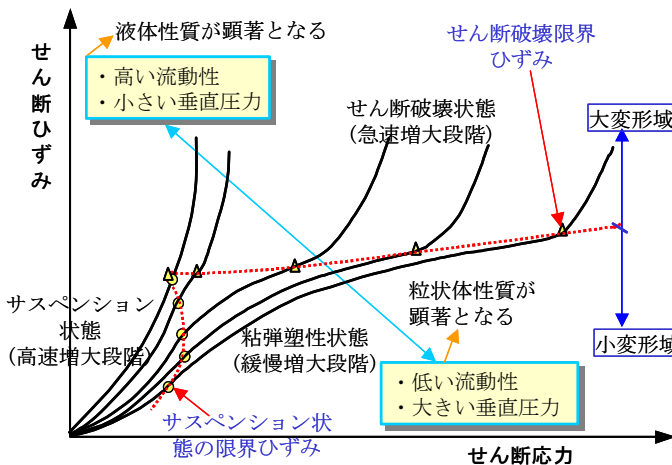
(b) 低せん断速度範囲の関係曲線

図5 フレッシュコンクリートの $\dot{\gamma}_m - \tau_m$ 関係曲線 (試料高さ: 100mm, 载荷速度: 5N/s)

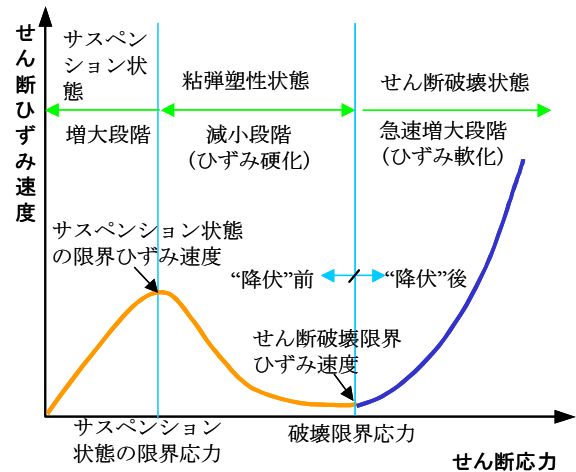
以上の実験結果は、小型せん断ボックスを用いた実験結果と一致しており、提案したフレッシュコンクリートのせん断変形モデル (図6を参照)⁵⁾を再度検証できた。フレッシュコンクリートの“降伏”前の変形挙動は、主に粘弾塑性状態の挙動であり、せん断ひずみ速度はせん断応力の増加に伴っ

て減少する。“降伏”後の変形挙動は、せん断破壊状態の挙動であり、せん断ひずみ速度はせん断応力の増加に伴って増大する。“降伏値”はせん断破壊限界応力に相当する。

4. 実験条件の影響の検討



(a) せん断ひずみーせん断応力関係



(b) せん断ひずみ速度ーせん断応力関係

図6 フレッシュコンクリートのせん断変形モデル

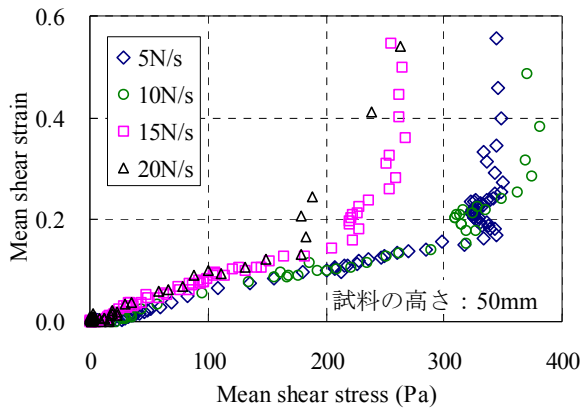


図7 M1 の $\dot{\gamma}_m - \tau_m$ 関係の実験結果に及ぼす荷重速度の影響

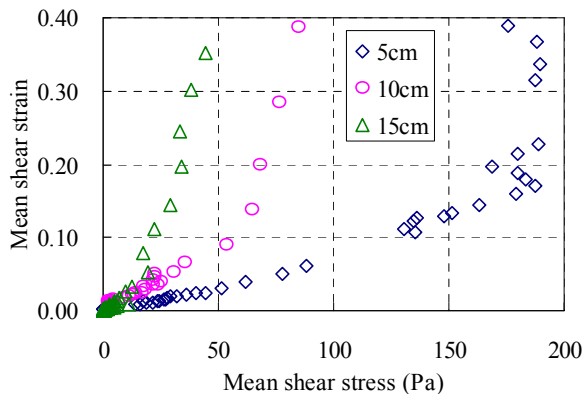
4.1 荷重速度の影響

変形・流動特性の試験結果に与える荷重速度の影響を調べるために、荷重速度を4水準に変化させてモルタル M1 の平均せん断ひずみ-平均せん断応力の関係曲線を図7に示すように測定した。本研究の荷重速度は、荷重計が検出したせん断荷重の増大速度ではなく、エアモーター駆動力の増大速度である。

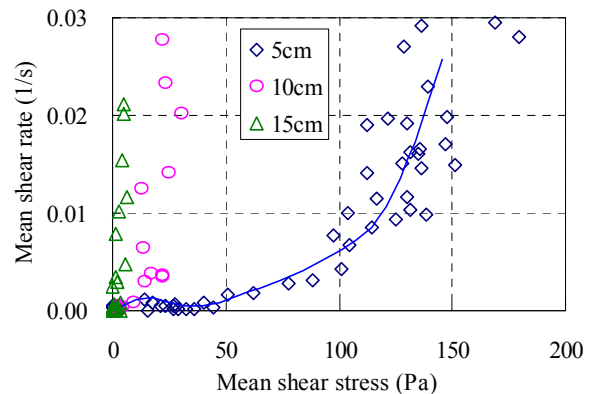
実験結果にばらつきが大きいのが、荷重速度が大きいほど、 $\dot{\gamma}_m - \tau_m$ 関係曲線はより左にシフトし、せん断破壊限界応力と限界ひずみは小さい傾向が見られた。原因が二つあると推測している。一つ目は、荷重速度が大きいと、せん断応力が試料の限界支持能力に達するまでの時間が短くなり、粒子移動やダイラタンシーによる内部構造が十分に強化できないことである。二つ目としては、荷重速度が大きくなると、単位時間あたりの荷重増加量は大きく、相応してせん断変形の増大量は大きくなる。つまり、せん断速度は大きくなる。試料と円筒内壁面との間に粘性抵抗があるため、せん断速度は大きくなると、容器壁面の粘性拘束は増大して、荷重計が検出したせん断荷重は小さく、 $\dot{\gamma}_m - \tau_m$ 関係曲線は左にシフトする。

4.2 試料高さの影響

図8~図10は、それぞれ試料の高さを変えさせて、5N/s の荷重速度で測定したコンクリート C1 とモルタル M1、M3 の $\dot{\gamma}_m$ や $\dot{\gamma}_m - \tau_m$ 関係曲線を示すものである。図8と図9によれば、コンクリート C1 とモルタル M1 の $\dot{\gamma}_m$ や $\dot{\gamma}_m - \tau_m$ の関係曲線は、試料の高さの減少に伴って右にシフトし、せん断破壊限界応力と限界ひずみが増大する。しか

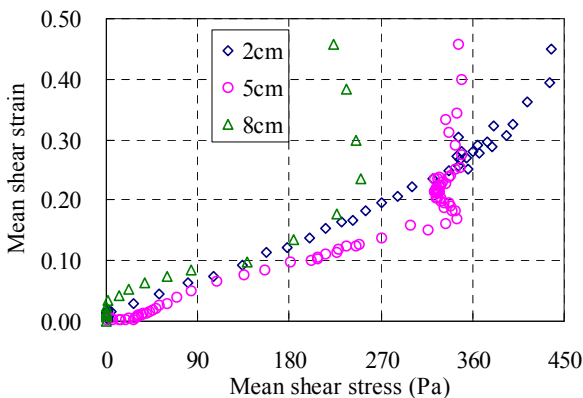


(a) $\dot{\gamma}_m - \tau_m$ 関係曲線

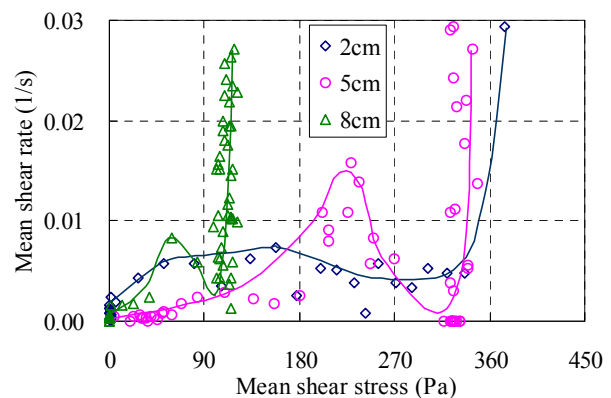


(b) $\dot{\gamma}_m - \tau_m$ 関係曲線

図8 コンクリート C1 の $\dot{\gamma}_m \cdot \dot{\gamma}_m - \tau_m$ 関係曲線の実験結果に及ぼす試料高さの影響

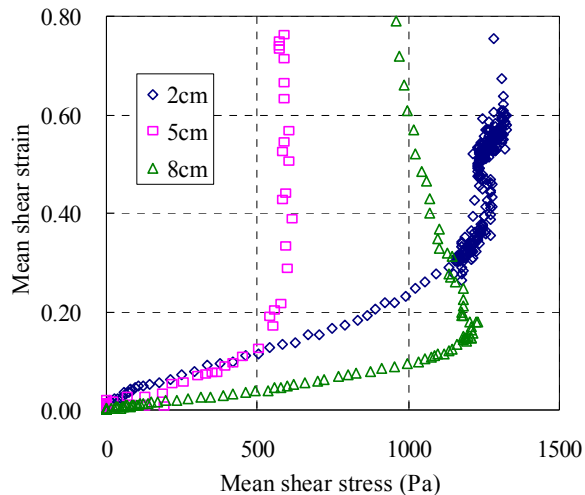


(a) $\dot{\gamma}_m - \tau_m$ 関係曲線

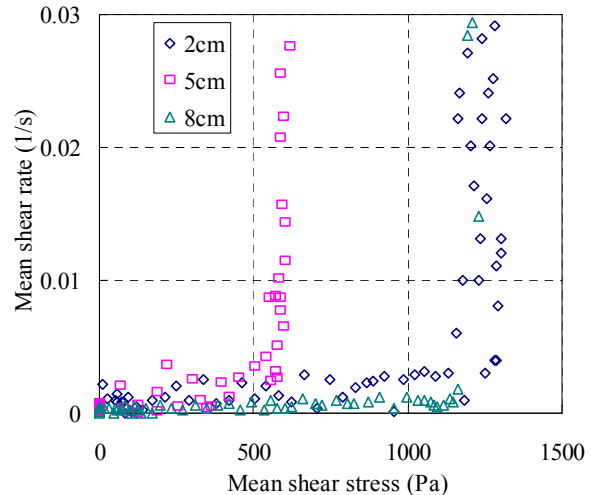


(b) $\dot{\gamma}_m - \tau_m$ 関係曲線

図9 モルタル M1 の $\dot{\gamma}_m \cdot \dot{\gamma}_m - \tau_m$ 関係曲線の実験結果に及ぼす試料高さの影響



(a) $\gamma_m - \tau_m$ 関係曲線



(b) $\dot{\gamma}_m - \tau_m$ 関係曲線

図 10 モルタル M3 の $\gamma_m \cdot \dot{\gamma}_m - \tau_m$ 関係曲線の実験結果に及ぼす試料高さの影響

し、コンクリート C1 と異なって、モルタル M1 のせん断破壊までの変形挙動は、試料の高さの影響をあまり受けない傾向が見られた。前述したように、円筒の内壁面と試料の間に存在する摩擦抵抗と粘性抵抗の拘束によって、荷重計が検出したせん断力は小さくなる。試料の高さが大きいほど、拘束面が大きくなり、拘束力は大きくなる。したがって、高い試料のせん断破壊限界を小さく測定される。

また、試料の高さをきわめて小さくすると、せん断層が薄く、サスペンション体特性より試料の粒状体特性が顕著になり、粒子接触による摩擦抵抗とダイラタンシーによる抵抗が大きくなると思われる。したがって、コンクリート C1 の高さが 5cm とモルタルの高さが 2cm の場合には測定したせん断破壊限界応力と限界ひずみは大幅に増大した。

M1 は高流動性のモルタルであるため、円筒壁面との摩擦抵抗および粘性抵抗が小さい。特に、低せん断速度の時には粘性抵抗は小さく、試料の高さの影響は大きくならないと思われる。

しかし、モルタル M3 の場合、図 10 に示すように、高さが 8cm の試料のせん断応力のピーク値と破壊後の $\dot{\gamma}_m$ は、高さが 2cm の時の値と殆ど同じであった。試料が高いほど、円筒壁面の拘束は大きくなって、前述したように測定したせん断力は小さい。しかし、M3 は硬練りモルタルであり、内部摩擦角が大きい。試料が高いと、重力による内部摩擦抵抗が大きくなるため、測定したせん断力は増大する傾向もある。したがって、せん断応力のピーク値の減少と増大の傾向が相殺され、計測したせん断応力のピーク値はあまり変わらない。

5. まとめ

本研究では、応力制御型リングせん断試験装置を開発

した。この装置は、セメント系材料のフレッシュ時のせん断破壊状態までの変形性質の評価に適用可能であり、せん断破壊限界応力と限界ひずみを測定できる。しかし、測定結果は、載荷速度と試料の高さに依存する。載荷速度が大きいほど、または流動性が高い試料の場合においては試料が高いほど、せん断破壊限界応力と限界ひずみの測定値は小さい。円筒の内壁面が試料に与える拘束力の存在によって、せん断力は小さく測定される。円筒内壁面の拘束力を低減することは今後の課題である。

謝辞

本研究の実験装置を加工するにあたっては、山口大学ものづくり創成センター 岩谷健治氏よりご協力をいただきました。ここに付記し、心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 谷川恭雄・森博嗣：コンクリートの「施工設計法」の確立をめざして、セメント・コンクリート, No.501, pp.11-20, 1988.11.
- 2) 山田義智・富山潤：確率過程論を用いたセメントペーストの流動曲線予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), A-1, pp.717-718, 2008.9.
- 3) 山田義智・大城武：フレッシュコンクリートの粘塑性構成式とその流動特性に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.253-258, 2001.
- 4) 李柱国・大久保孝昭・森博嗣・谷川恭雄：高流動コンクリートのせん断流動挙動に関する理論的考察, 日本建築学会構造系論文集, No.563, pp.1-8, 2003.1.
- 5) 李柱国・李潔勇：フレッシュコンクリートのせん断変形特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, pp.1173-1180, 2010.7.
- 6) Hu, C.: The rheology of Fluid Concretes, *Doctoral Thesis*, National school of Bridges and Roads, pp.49-50, 1995.1(in French).