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
EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON SHEAR DEFORMATION OF FRESH CONCRETE

李 柱 国*, 李 潔 勇**

Zhuguo LI and Jieyong LI

The clarification and modeling of fresh concrete's rheological performance is basically needed for realizing the workability design of fresh concrete. In this study we investigated experimentally the shear deformation of cementitious materials in fresh state using a stress growth method, and discussed the effects of fluidity, vertical pressure, loading rate, maximum size of particle, and volume concentration of solid particle. Then, we proposed a deformation model to describe the free deformation property of fresh concrete under shear stress. As a result, fresh concrete's shear deformation would experience suspension state, visco-elasto-plastic state and shear failure state with increasing shear stress, and it shows different features in different stress state due to particles' contacts and dilatancy. Also, the fluidity of specimen and the vertical pressure produce great effects on the shear strain/ rate-shear stress relationships.

Keywords: Fresh concrete, Shear deformation, Stress controlled method, Stress state, Dilatancy

フレッシュコンクリート, せん断変形, 応力制御試験法, 応力状態, ダイラタンシー

1. はじめに

コンクリートのワーカビリティは、その打込みおよび硬化後の品質に大きな影響を与える。ワーカビリティは、運搬・打込み・締固め・仕上げなどのフレッシュコンクリートの移動・変形を伴う作業の容易さと、それらの作業によってもコンクリートの均一性が失われないような総合的な性質であると定義されている¹⁾。したがって、良好なワーカビリティを有するために、コンクリートは、施工方法及び部材条件に応じた適切な変形抵抗性と分離抵抗性を有する必要がある。しかし、現在、ワーカビリティの評価、調査技術はまだなく、フレッシュコンクリートの品質は、図1に示すように、流動性の程度を表すスランプやスランブフローのみによって規定されている。

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、スランプやスランブ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、建物の大型化・高層化およびポンプ車の性能向上に伴い、コンクリートの

ポンプ圧送の速度・高度・距離は増大してきている。さらに、建物の高層化と耐震性能の確保のために、鉄筋が密に配置されて、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、施工方法及び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²⁾。

図2は、谷川・森が1988年に提唱した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）の概念を示したものである²⁾。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、表1に示すように、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。

フレッシュコンクリートは、水と固体粒子によって構成される不

図1 JASS 5に規定されている各種コンクリートの流動性¹⁾

図2 施工設計（ワーカビリティ判定）のコンセプト

* 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)

** 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・修士(工学)

Assoc. Prof., Dept. of Information and Design Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University, Dr. Eng.
Graduate Student, Dept. of Information and Design Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University, M. Eng.

表1 提案されたフレッシュコンクリートの流動解析手法

手法	材料モデル	解析モデル	出典
粘塑性有限要素法 (VFEM)	連続体モデル (単相モデル)	複合モデル	森ら ³⁾
粘塑性空間要素法 (VDSEM)			谷川ら ⁴⁾
フリーメッシュ法 (SPH 法、MPS 法、FMM 法)		bi-viscosity モデル	崎原ら ⁵⁾
MAC 法			入部ら ⁶⁾
オイラー型有限要素法			富山ら ⁸⁾
剛塑性有限要素法			山田ら ⁷⁾
オイラー・ラグランジェ複合型有限要素法			富山ら ⁹⁾ 山田ら ¹⁰⁾
		チクソトロピー型ビンガムモデル	Roussel ¹¹⁾
粘塑性サスペンション要素法 (VSEM)	2 相モデル (モルタルと粗骨材)	複合モデル	森ら ¹²⁾
		ひずみ依存型モデル	三島ら ¹³⁾
個別要素法 (DEM)	離散体モデル	ビンガムモデル	Chu ら ¹⁴⁾

均質で不安定な複合材料である。固体粒子の粒径は数 μm から数十 mm までの広範囲に及んでいる。粒子の凝集・分散および粒子間の摩擦・接触・衝突などによって、フレッシュコンクリートの変形・流動挙動は、チクソトロピー特性、圧力依存性およびダイラタンシー特性などを示し、非常に複雑である。また、管内圧送に耐えるような液体に近いものから、ローラーコンパクトドコンクリートのような硬練りのものまで、性質の相違が著しい。ビンガムモデルは、本来、粘性流体に適用するモデルであるため、硬練りコンクリートの適用に無理が生じる。高流動コンクリートの場合でも、フレッシュコンクリートの変形抵抗性の圧力依存性¹⁵⁾、ひずみ依存性¹³⁾、非線型特性^{16, 17)}およびチクソトロピー¹⁸⁾などが表現できない。また、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¹⁹⁾。フレッシュコンクリートのレオロジー的性質を実験的に考察して、モデル化する試み^{14, 15)}があったものの、レオロジー的性質を的確に把握し、広範囲のコンクリートの変形・流動挙動を的確に表すモデルが構築されるには至っていない。

二重円筒型回転粘度計、回転翼型粘度計および球引上げ粘度計などの既存のレオロジー試験方法のほとんどは、従来均質な液体を対象に開発されたものであり、せん断ひずみ速度の増減に伴うせん断応力の変化を観測するひずみ速度制御試験法である。つまり、強制変形下のせん断抵抗を測定するものである。これらの試験法で得られた実験結果に基づいて提案されたモデルは、せん断抵抗モデルであると考えられる。

しかし、コンクリートの圧送と打込み時の流動は、自重や圧力による自由変形である。また、圧送閉塞や障害物流動閉塞は、低速流動を経て停止に至る現象である。コンクリートの施工設計の最も大きい関心事が、その充填性を確実に実現することにあるため、自重や圧力による流動およびポンプ配管内や鉄筋間における流動閉塞の予測は極めて重要である。そこで、応力制御試験法によって、フレッシュコンクリートの小変形・低速変形から高速流動までのレオロジー的性質を定量的に解明し、それらの性質を完全に反映するレオロジーモデル化を構築することは重要な課題である。

表2 コンクリートの調査表

Series	W/C (%)	D_{max} (mm)	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	50	20	43.0	180	360	695	1047	1.25	-	595	1.71
C2	50	20	45.2	175	350	739	1020	1.00	22.5	-	-
C3	50	9.5	42.9	175	350	700	1060	1.50	22.5	-	-
C4	50	20	40.0	175	350	657	1119	1.50	-	603	3.65
C5	50	20	41.1	170	340	674	1100	1.00	14.0	-	-

[注] W/C: 水セメント比、S/a: 細骨材率、 D_{max} : 粗骨材の最大寸法、W, C, S, G, S_p : それぞれ水、セメント、海砂、砕石、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 モルタルの調査表

Series	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
W/C (%)	40	45	50	40	45	50	50	50
S/C	1.50	1.50	1.50	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80
d_{max} (mm)	5						1.18	2.36

[注] S/C: 砂-セメント質量比、 d_{max} : 砂の最大寸法

表4 セメントペーストの調査表

Series	CP1	CP2	CP3	CP4
W/C (%)	33	36	39	30

表5 骨材の物理性質

	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	砕石	20	59.4	-	2.73	0.39	1620
細骨材	海砂	5	-	1.79	2.62	0.75	-

筆者らは、この背景を踏まえて、応力制御法によってフレッシュコンクリートの小変形・低速変形際の挙動について考察してきた²⁰⁾。

本研究では、まず、応力制御試験法を用いて、フレッシュセメント系材料の変形挙動に及ぼす試料の流動性、垂直圧力、荷重速度、骨材の最大寸法、固体粒子の体積濃度および荷重持続時間の影響について詳細に調べる。次に、実験結果に基づいて、フレッシュコンクリートのせん断変形モデルを提案し、各要因がモデルのパラメータに与える影響をまとめる。

2. 実験概要

2.1 試料の調査

本研究の実験に用いた調査を表2~4に示す。普通ポルトランドセメント、海砂、砕石および標準型高性能 AE 減水剤を用いた。骨材の物理性質を表5に示す。コンクリート試料 C3 に用いた砕石は、表5に示す砕石を開き目が9.5mmの篩でふるったものである。また、モルタル試料 M7 と M8 に用いた砂は、それぞれ図5に示す海砂を開き目が1.18mm と 2.36mm の篩でふるったものである。

2.2 実験装置

図3に示す小型せん断ボックス試験機を用いた。せん断ボックスに充填した試料のサイズは、幅 30cm×奥行き 20cm×深さ 20cm である。また、試料とせん断ボックスの内側壁の間に生じる摩擦・粘性抵抗を低減するために、ボックスの側壁は、図4に示すように、U字型アルミ部材をリニアベアリングによって接合した構造になっている。したがって、試料を直接にせん断ボックスに充填することができず、ビニル袋を詰めてボックスに挿入した。

図3 小型せん断ボックス試験機(応力制御とひずみ制御両用型)

図4 せん断ボックスの側壁の構造

図5 応力制御試験法の原理図

この試験機は、応力制御とひずみ制御の両用型のものである。ひずみ制御法の場合には、ボックスの底部を固定して、ステッピングモータによってボックスの頂部を駆動して、頂部の水平変位を測定する。応力制御法で試験する場合、ボックスの頂部を固定して、エアシリンダーでせん断ボックスの底部にせん断荷重を加え、底面の水平変位を変位計で測定する(図5の原理図を参照)。加えたせん断荷重をロードセルで測定する。コンプレッサとエアシリンダーの間に存在するレギュレータで空気圧を制御することによって、エアシリンダーの駆動力をゼロから1kNまで増大させる。また、試料の上面に載せる重りを変えて垂直圧力を調整する。

載荷速度および垂直圧力のレベルを変えて、高粘性校正材料によって実験装置の抵抗を予め測定した²⁰⁾。装置抵抗を測定した際に用いたビニル袋は、コンクリート実験に使ったものと同じである。高

粘性校正材料は、コーンシロップと石灰石微粉末で作られたニュートン体であり、その粘度は平行板粘度計で測定した。

2.3 実験方法

練り混ぜ直後の試料を厚みが0.03mmのビニル袋に詰めた後にせん断ボックスに入れ、垂直圧力を加えるための板状重りを試料の上に載せた。実験結果の図に注記する場合を除き、試料の高さは18cmとした。次に、載荷速度を設定して、エアシリンダーの駆動で、せん断ボックスの底部に水平荷重を加えた。同時に、加えた水平力とボックスの底面の水平変位を0.01sごとに測定した。

測定した水平力から装置抵抗を引いて、試料のせん断応力を計算した。また、測定した時間ごとの水平変位からせん断ひずみとせん断ひずみ速度を求めた。垂直圧力は、載せた重りの重量を試料の面積で除すことによって算定した。

3. せん断変形特性およびモデル化

3.1 応力制御法で測定した流動曲線

図6に、応力制御法で得られたセメントペースト、フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートのせん断ひずみとせん断応力の関係を示す。せん断ひずみが0.9以下の小変形領域において、試料の種類に拘わらず、せん断ひずみは、せん断応力の増大に伴って大きくなったが、試料の流動性および応力レベルによって増大傾向が異なることがわかった。各試料のせん断ひずみは、応力の増大に伴って、最初に急激に増大した(グラフが右下に凸)が、ある値に達すると、緩やかに増大する(グラフが左上に凸)傾向が見られた。ここに、最初の段階を高速増大段階と、次の段階を緩慢増大段階と呼ぶことにする。また、同図に示すように、試料の流動性が高いほど、高速増大段階の限界ひずみが大きい、限界せん断応力は小さかった。

図6(a)に示すように、セメントペーストの場合には、せん断ひずみは、緩慢に増大した後、再度急激に大きくなり、せん断応力が減小する傾向が見られた。この段階を急速増大段階と称することにする。同図に示すように、セメントペーストの流動性が高いほど、2度目に増大し始める時点のひずみと応力は共に小さかった。用いた小型せん断ボックスで測定できる最大のせん断ひずみは1.0に限られているため、今回の実験ではモルタルとコンクリート試料のひずみの急速増大段階の挙動を観察できなかった(図6(b), (c)を参照)。

図7に、応力制御法で得られたセメントペースト、フレッシュモルタルおよびフレッシュコンクリートのせん断ひずみ速度とせん断応力の関係を示す。これらの図に示すように、モルタルとコンクリートの試料の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、逆に減小する傾向が見られた(図7(b), (c)を参照)。一方、図7(a)より、セメントペーストのせん断ひずみ速度は、増大→減小→急速増大という3段階で変化することが観察された。また、図7(a)に示すように、試料の流動性が高いほど、ピークせん断速度とそれに対応するせん断応力が小さく、2度目に増大し始めるひずみ速度は大きかったが、それに対応するせん断応力は小さかった。

3.2 せん断変形モデルの提案

本研究では、応力制御法によって測定したせん断ひずみ/速度は、フレッシュコンクリートの外力に対する自由変形応答である。したがって、この実験結果に基づいて下記に提案したモデルは、応力作

図6 セメント系材料のフレッシュ時のせん断ひずみとせん断応力の関係(垂直圧力: 0Pa)

図7 セメント系材料のフレッシュ時のせん断ひずみ速度とせん断応力の関係(垂直圧力: 0Pa)

用下のせん断変形モデルであると考えている。

前述のように、応力の増大に伴って、セメントペーストのせん断ひずみは、高速増大→緩慢増大→急速増大という順で変化し、せん断ひずみ速度は増大→減小→急速増大する特徴が現れた。しかし、せん断ボックスの水平せん断変位に制限 (18cm) があるため、測定できる最大せん断ひずみは 1.0 (試料厚さ: 18cm の場合) である。モルタルとコンクリート試料の急速増大段階におけるせん断ひずみ/速度とせん断応力の関係曲線が測定できなかった。後述のように、これは、大きい粒子を含む試料は、急速増大段階に至るまで、大きな変形 (せん断ひずみ) が必要であるためであると考えている。上記の実験結果に基づいて、フレッシュコンクリートのせん断変形モデルを図8に示すように提案した。

フレッシュ状態のセメント系材料は、水と粒子で構成されているため、そのレオロジー的性質は粒子のインターロッキングとダイラタンシーに依存する。試料の応力状態は、せん断応力の増大に伴って、粒子

の接触程度とダイラタンシーによって、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順に移行する。サスペンション状態の限界応力とひずみおよびせん断破壊限界応力とひずみによって試料の応力状態を区別する。前述した高速増大段階、緩慢増大段階および急速増大段階における変形挙動は、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に対応するものであると思われる。

フレッシュコンクリートがせん断力を受ける初期では、粒子の噛み合いまたはインターロッキングの程度が小さいため、高濃度サスペンションとみなすことができ、流体の特徴が顕著である。せん断応力の増大に伴って、ひずみが大幅に増大して、せん断ひずみ速度が大きくなる (図8(a), (b)に示すサスペンション状態)。

粒状体の粒子挙動の可視化実験の結果によれば、粒子が受けた外力に対抗するため、滑動抵抗が大きい位置に移動して、平均粒子接点角は増大するが、ある限界を超えると、逆に変形と共に減小して

図8 フレッシュコンクリートのせん断変形モデル

いく²¹⁻²²⁾。これによって、外力を受けたフレッシュコンクリート中の粒子は、まず外力によって移動して、ついに外力による粒子間力に対抗できる位置に至り、粒子の噛み合いの程度は大きくなる。粒子の噛み合いの程度が大きくなると、内部摩擦抵抗が大きくなり、ダイラタンシーが発生し、試料の変形抵抗が大きくなる（ひずみ硬化と呼ばれる）。マクロな現象として、ダイラタンシーの発生に伴って、せん断方向に直交する方向に垂直ひずみが生じる。したがって、せん断応力の増大に伴って、せん断ひずみは大きくなるが、その増大量は小さくなる。つまり、試料の自由変形速度（せん断ひずみ速度）は小さくなる。この段階では、試料が粘弾塑性状態にあると考えられる（図 8(a)の緩慢増大段階、図 8(b)の減小段階）。

しかし、せん断応力をさらに増大すると、一部の粒子は、滑動抵抗の限界を超える粒子間力を受けるため、粒子間力に対抗できる位置に至らず、滑動し続ける²¹⁾。このような粒子を破壊粒子と呼ぶことにする。破壊粒子が生じると、試料はせん断破壊状態に入り、その変形抵抗は変形と共に減少していく（ひずみ軟化と呼ばれる）。マクロな現象として、試料のせん断ひずみは大幅に増大し、せん断ひずみ速度は応力と共に急激に増大する（図 8(a), (b)の急速増大段階）。セメントペーストの 2 度目のせん断ひずみ速度の増大は、せん断破壊状態の挙動であると考えられる。

本研究では、セメントペーストのみのせん断破壊状態におけるひずみの急速増大現象を観察できた。現在のせん断実験装置で、フレッシュコンクリートのせん断破壊状態の挙動を直接に観察できないが、土などの粘弾塑性材料の特性を考慮すると、フレッシュコンクリートは、粘弾塑性材料（含水粒状体）として、せん断破壊状態が存在し、破壊状態においてはせん断ひずみ速度が図 8(b)に示すように応力と共に増大すると考えることができる。

フレッシュコンクリートは、せん断破壊状態に至る直前に、粘弾塑性状態にあり、そのせん断ひずみ速度はかなり小さいため、二重

円筒などによるレオロジー試験では測定されにくく、マクロな現象としての流動は観察されない。したがって、“降伏”前の状態は、せん断破壊状態までの状態に相当すると考えられる。

3.1 節に述べた実験結果より、セメント系材料の流動性が高いほど、サスペンション状態の限界応力、せん断破壊限界応力およびせん断破壊限界ひずみは小さいが、サスペンション状態の限界ひずみは大きいことが認められた。また、試料の流動性が高いほど、サスペンション状態の限界せん断速度が大きく、限界せん断応力が小さいことがわかった。

試料のせん断ひずみ-せん断応力関係曲線の流動性による変化傾向を図 8(a)に示す。流動性の低下に伴って、フレッシュコンクリートの粒状体特性は顕著となり、粘弾塑性状態は長く持続する。提案したモデルは、硬練りから高流動までの広範囲のコンクリートのせん断変形特徴を表すことができる。

4. せん断変形特性に対する各要因の影響

4.1 垂直圧力の影響

図 9 は、垂直圧力を変えて応力制御法で測定したせん断ひずみとせん断応力の関係曲線を示したものである。同図に示すように、同じせん断応力に対して、垂直圧力の増大に伴って、せん断ひずみが小さくなる傾向が見られた。垂直圧力の増大に伴って、サスペンション状態の限界ひずみが小さくなったが、限界応力は大きくなった。サスペンション状態の限界ひずみの減少は、垂直圧力の増大に伴って、粒子の噛み合いが急速に増大し、サスペンション状態が速やかに終了したためであると推測している。

図 9(a)では、セメントペースト CP4 のせん断破壊状態における自由変形挙動が見られた。せん断破壊状態に至ると、せん断応力はあまり増えなくても、または減少しても、せん断ひずみは大幅に増大した。また、せん断破壊限界応力と限界ひずみは、垂直圧力と共に大きくなることが

図 9 セメント系材料のフレッシュ時のせん断ひずみとせん断応力の関係に及ぼす垂直圧力の影響(载荷速度: 5N/s)

図 10 セメント系材料のフレッシュ時のせん断ひずみ速度とせん断応力の関係に及ぼす垂直圧力の影響(载荷速度: 5N/s)

図 11 各試料のせん断ひずみとせん断応力の関係に及ぼす載荷速度の影響(垂直圧力: 0Pa)

図 12 各試料のせん断ひずみ速度とせん断応力の関係に及ぼす載荷速度の影響(垂直圧力: 0Pa)

わかった。これは、粒子の噛み合いが垂直圧力とともに増大し、内部摩擦抵抗およびダイラタンシーによる抵抗が大きくなったためである。

図 10 に、せん断ひずみ速度-せん断応力関係に及ぼす垂直圧力の影響を示す。同図によれば、垂直圧力の増大に伴って、せん断ひずみ速度およびサスペンション状態の限界ひずみ速度が小さくなり、サスペンション状態の限界応力が増大することが認められた。なお、図 10(a)に示すように、垂直圧力が小さいほど、試料 CP4 のせん断破壊限界応力は小さく、限界ひずみ速度は大きくなった。試料 CP4 はせん断破壊状態に至ると、そのせん断ひずみ速度が、応力の増加と共に急激に増大する傾向が見られた。

試料のせん断ひずみ-せん断応力関係曲線の垂直圧力による変化傾向を図 8(a)に示す。垂直圧力の増大に伴って、フレッシュコンクリートの粒状体特性が顕著となり、粘弾塑性状態は長く持続する。

4.2 載荷速度の影響

図 13 せん断ひずみとせん断応力の関係に及ぼす粒子最大寸法の影響(載荷速度: 6N/s, 垂直圧力: 0Pa)

図 11 に、各試料のせん断ひずみとせん断応力の関係に及ぼす載荷速度の影響を示す。同図を見ると、載荷速度が大きいくほど、同じせん断応力によるせん断ひずみが大きく、サスペンション状態の限界ひずみは大きくなったが、限界応力は小さくなる傾向が見られた。

また、図 12 に、各試料のせん断ひずみ速度とせん断応力の関係に及ぼす載荷速度の影響を示す。同図によれば、載荷速度の増大に伴って、サスペンション状態の限界ひずみ速度は大きくなったが、限界せん断応力は小さくなる傾向が見られた。

なお、図 12(a)に示すように、載荷速度が大きいくほど、せん断ひずみ速度の減小段階における最小せん断速度、つまり、せん断破壊限界せん断ひずみ速度は大きいが、限界応力は小さかった。

4.3 粒子の最大寸法の影響

図 13 に、骨材粒子の最大寸法が異なる細骨材と粗骨材を用いたモルタル、コンクリートのせん断ひずみとせん断応力の関係を示す。

図 14 せん断ひずみ速度とせん断応力の関係に及ぼす粒子の最大寸法の影響(載荷速度: 6N/s, 垂直圧力: 0Pa)

図 15 セン断ひずみとせん断応力の関係に及ぼす粒子体積濃度の影響(載荷速度: 6N/s, 垂直圧力: 0Pa)

図 16 セン断ひずみ速度とせん断応力の関係に及ぼす粒子体積濃度の影響(載荷速度: 6N/s, 垂直圧力: 0Pa)

この図に示すように、粒子の最大寸法が大きいほど、サスペンション状態の限界ひずみは小さい。しかし、サスペンション状態の限界せん断応力に一定の傾向が見られなかった。これは試料の流動性が支配的な影響を与えたためである。

また、図 14 は、せん断ひずみ速度とせん断応力の関係を示したものである。粒子の最大寸法の増大しても、サスペンション状態の限界せん断ひずみ速度および限界せん断応力に一定の傾向は見られなかった。これは、試料の粘性と粒状体性質が支配的な影響を与えたためである。例えば、最大寸法が 5mm の砂を使用した試料 M6 は、粘性が低い、粒状体特性が顕著であるため、せん断速度は必ずしも大きくはならない。

4.4 粒子体積濃度の影響

図 15 は、固体粒子体積濃度が異なるセメントペーストおよびモルタルのせん断ひずみ-応力関係曲線を示したものである。同図に示すよう

に、同じせん断応力に対して、粒子体積濃度が小さいほど、せん断ひずみが大きい。また、粒子体積濃度の减小に伴って、サスペンション状態の限界ひずみは大きくなったが、限界応力は减小する傾向が見られた。

図 16 に、粒子体積濃度が異なる試料のせん断ひずみ速度-応力曲線を示す。同図によれば、試料の粒子体積濃度が大きいほど、サスペンション状態の限界ひずみ速度は小さく、限界せん断応力は大きくなるのが認められた。

4.5 載荷持続時間の影響

図 17 に、せん断応力と垂直圧力が一定である時におけるセメント系材料のフレッシュ時のせん断変形の経時変化を示す。同図に示すように、所定のせん断荷重と垂直圧力を加えると、試料のせん断ひずみは、高速増大段階および緩慢増大段階を経て大きくなった。また、せん断ひずみ速度は、最初に増大するが、ある値に達すると、

(1-1) ひずみの経時変化(垂直圧力: 0kPa)

(2-1) ひずみの経時変化(垂直圧力: 1.3kPa)

(3-1) ひずみの経時変化(垂直圧力: 0Pa)

(1-2) ひずみ速度の経時変化(垂直圧力: 0kPa)

(2-2) ひずみ速度の経時変化(垂直圧力: 1.3kPa)

(3-2) ひずみ速度の経時変化(垂直圧力: 0Pa)

図 17 セメント系材料のフレッシュ時のせん断変形の経時変化 (試料の高さ: 15cm)

表6 サスペンション状態の限界応力、せん断ひずみおよびせん断ひずみ速度に及ぼす各種要因の影響

	τ_c	γ_c	$\dot{\gamma}_c$
流動性を増大	小	大	大
垂直圧力を増大	大	小	小
載荷速度を増大	小	大	大
粒子の最大寸法を増大	大	小	—
粒子の体積濃度を増大	大	小	小

[注] τ_c : サスペンション限界応力、 γ_c : サスペンション限界ひずみ、 $\dot{\gamma}_c$: サスペンション限界ひずみ速度

減小していく傾向が見られた。各試料のせん断破壊状態を含めた各応力状態の挙動を観察するために、せん断破壊限界応力より大きいせん断応力を加えた。本実験装置では、測定できる最大せん断ひずみが限られているため、破壊限界応力以上のせん断荷重を加えても、せん断破壊段階の変形特性は観察できなかった。

上記の実験結果に基づいて、サスペンション状態の限界応力、限界ひずみおよび限界ひずみ速度に及ぼす各要因の影響を表6にまとめて示す。せん断破壊状態の限界応力、ひずみおよびひずみ速度の影響要因についての詳細な検討は今後の課題である。

5. まとめ

本研究では、小型せん断ボックス試験機を利用して、応力制御法でフレッシュセメント系材料の外力に対する自由変形応答およびそれに与える各種要因の影響について考察した。得られた結果に基づいて、硬練りから高流動までの広範囲のフレッシュコンクリートのせん断変形特性を表現するモデルを図8に示すように提案した。得られた知見は、以下のようにまとめられる。

- 1) フレッシュコンクリートの応力状態は、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に分けられる。各状態における外力下の挙動は、自由変形応答である。
- 2) 粘弾塑性状態において、ダイラタンシーによる抵抗が外力と共に増大するため、外力に対する応答としての自由変形は増大するが、変形速度は減小する。
- 3) 流動性、垂直圧力および粒子体積濃度の増加に伴って、フレッシュコンクリートの粒状体特性は顕著になり、ダイラタンシーが発生しやすくなるため、サスペンション状態の限界ひずみとひずみ速度は小さくなるが、サスペンション状態の限界応力およびせん断破壊限界ひずみと限界応力は増大する。
- 4) 載荷速度が大きいほど、せん断ひずみと速度は大きく、サスペンション状態の限界ひずみと速度は大きくなるが、限界応力は小さくなる。

現在のせん断実験装置では、すべての試料のせん断破壊状態における変形挙動が測定できなかった。今後、応力制御法で大変形状態を測定できる装置を開発して、大変形時の挙動について考察し、各種の限界応力、限界ひずみおよび限界ひずみ速度の影響要因を定量的に調べる必要がある。また、理論解析を行い、せん断応力-せん断ひずみ/速度の関係式を求める予定である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、装置の設計・試作に筑波大学大学院システム情報工学研究科 飯高稔氏にご協力をいただきました。こ

こに、付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説、JASS 5 鉄筋コンクリート工事、pp.163-165, 1997.
- 2) 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.
- 3) 森博嗣・谷川恭雄：粘塑性有限要素法によるフレッシュコンクリートの流動解析、日本建築学会構造系論文集、No.374, pp.1-9, 1987.4.
- 4) Tanigawa, Y., Mori, H., and Watanabe, K.: Flow simulation of fresh concrete by Viscoplastic Divided Space Element Method, *Proc. of 33rd Japan Congress on Materials Research*, pp.227-233, 1990.3.
- 5) 崎原康平・伊良波繁雄ほか：SPH法によるフレッシュコンクリートの流動解析、コンクリート工学年次論文集、Vol.26, No.1, pp.1149-1154, 2004.
- 6) 入部綱清・伊良波繁雄ほか：MPS法による粗骨材を考慮したフレッシュコンクリートの三次元流動解析、コンクリート工学年次論文集、Vol.26, No.1, pp.1161-1166, 2004.
- 7) 山田義智・大城武・樹田佳寛：フレッシュコンクリート流動解析へのMAC法の適用、コンクリート工学年次論文集、Vol.20, No.1, pp.131-136, 1998.
- 8) 富山潤・山田義智ほか：フリーメッシュによるフレッシュコンクリートの粘塑性流動解析、コンクリート工学年次論文集、Vol.24, No.1, pp.861-866, 2002.
- 9) 富山潤・山田義智ほか：オイラー型有限要素法によるフレッシュコンクリートの流動解析、コンクリート工学年次論文集、Vol.27, No.1, pp.1039-1044, 2005.
- 10) 山田義智・桃原睦・大城武：有限要素法によるフレッシュコンクリートの粘塑性流動解析、コンクリート工学年次論文集、Vol.23, No.2, pp.253-258, 2001.
- 11) Roussel, N.: A thixotropy model for fresh fluid concrete: theory, validation and application, *Cement and Concrete Research*, Vol.36, pp.1797-1806, 2006.
- 12) 森博嗣・渡辺健治・梅本宗宏・谷川恭雄：二相モデルを用いたフレッシュコンクリートの流動解析手法、日本建築学会構造系論文集、No.427, pp.11-21, 1991.9.
- 13) Chu, H., Machida, A., and Suzuki, N.: Experimental investigation and DEM simulation of filling capacity of fresh concrete, *Trans. of the Japan Concrete Institute*, Vol.16, pp.9-14, 1996.
- 14) 森博嗣・田中政史・谷川恭雄：フレッシュコンクリートのせん断変形性質に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文報告集、No.421, pp.1-10, 1991.3.
- 15) 三島直生：ダイラタンシーおよび凝集を考慮した高濃度サスペンションのレオロジーモデルの構築とその定量化に関する研究、名古屋大学博士論文、pp.98-100, 2001.3.
- 16) Wallevik, J. E.: Rheology of particle suspensions, Ph. D Thesis of Norwegian University of Science and Technology, pp.11-47, 2003.2
- 17) Zhuguo Li, Taka-aki Ohkubo, and Yasuo Tanigawa: Flow performance of high fluidity concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, American Society of Civil Engineering, Vol.16, No.6, pp.588-596, 2004.12.
- 18) Zhuguo Li, Taka-aki Ohkubo, and Yasuo Tanigawa: Theoretical analysis of time-dependence and thixotropy of high fluidity concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, American Society of Civil Engineering, Vol.16, No.3, pp.195-201, 2004.6.
- 19) 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
- 20) Zhuguo Li, Jieyong Li, and Wenbo Zhang: Mechanical responses of freshly mixed cementitious materials to small and slow shear deformation, *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, Vol.31, No.1, pp.1441-1446, 2009.
- 21) 村山朝郎：土の力学挙動の理論、技報堂出版、pp.27-375, 1990.
- 22) 李柱国・飯高稔：モデル材料を用いた可視化実験によるフレッシュコンクリートの粒状体特性の解明、日本建築学会中国支部研究発表報告集、Vol.32, No.109, pp.1-4, 2009.3.

(2009年12月23日原稿受理、2010年4月12日採用決定)