

# セメント系材料の硬化前の粒子配列に及ぼすせん断変形の影響に関する考察

## Investigation on Effects of Shear Deformation on the Particle Fabric of Freshly Mixed Cementitious Materials

李 柱国<sup>a</sup>, 梶原 聖太郎<sup>b</sup>  
 Zhuguo Li<sup>a</sup>, Kentaro Kajiwara<sup>b</sup>

<sup>a</sup> 山口大学, <sup>b</sup>(財)高輝度光科学研究センター  
<sup>a</sup> Yamaguchi University, <sup>b</sup> Japan Synchrotron Radiation Research Institute

本研究では、フレッシュコンクリートの粒状体特性を解明することを目的として、産業利用ビームラインによって、水、アルミナ粒子および標準砂からなるフレッシュモルタルの内部構造とせん断変形による変化を撮影した。画像分析によって、モルタルの平均粒子接点角とせん断変形の関係傾向を明らかにした。

キーワード：フレッシュモルタル、粒状体特性、せん断変形、粒子接点角、CT イメージング

### 1. 背景と研究目的：

フレッシュコンクリートの流動性は、その施工効率だけではなく、その充填性にも大きな影響を与える。流動性は低すぎると、ポンプによる搬送と鉄筋の間における流動ができず、充填性が低い。コンクリートの施工性能を合理化することが求められているが、施工性能の設計・照査技術が確立されていない。施工過程の数値流動シミュレーションは施工性能の設計・照査に非常に有効であるが、フレッシュコンクリートの力学モデルが確立されていないため、正確なシミュレーションが行われない。レオロジー特性の解明は急務な課題である。

フレッシュコンクリートは、水、セメント、骨材から構成されて、流体と粒状体の二重特性をもつものであり、その流動性の高低が流動抵抗に決定される。流動抵抗は、流体としての粘性抵抗と粒状体としての粒子接触による抵抗に構成される。現在、フレッシュコンクリートの粒状体性質に関する研究はあまりなく、流動抵抗のメカニズムが明らかになっていない。

粒子集合体の変形・流動抵抗は、粒子間の摩擦抵抗と粒子配列による抵抗を含み、その粒子滑動抵抗角(粒子配列による粒子接点角と内部摩擦角の和)の分布と中央値に依存すると考えられる[1]。粒子接点角の概念を図1に示す。したがって、粒子配列および変形に伴う変化の考察は、フレッシュコンクリートの流動抵抗の解明およびモデル化に極めて必要である。

フレッシュコンクリートの粒状体特性を解明して流動抵抗性の力学モデルを構築し、コンクリートの施工過程をシミュレートするための数値解析技術を開発する基礎研究として、研究代表者は、既に光学ガラスブロックより作製した粒子やガラスビーズの非粘着性粒子集合体を利用して、Laser Tomograph Aid 法によって、骨材粒子配列とせん断変形・せん断応力の関係を考察した[2]。また、普通ポルトランドセメント、セメント代替材料—水和反応が発生しない高炉スラグ微粉末、フライアッシュを利用して、粘着性があるペースト試料を作製して、産業利用ビームラインの CT イメージング(課題番号：2010A1832, 2011A1754)によって、その粒子配列の観察を試みた。しかし、粒子鉱物成分の不均一性や使用した塩ビ試料容

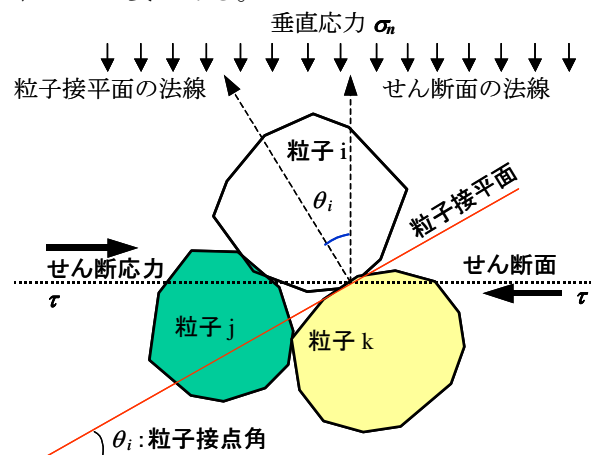
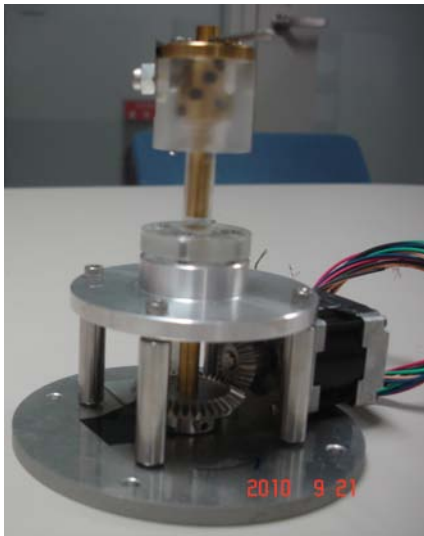


図1. 粒子接点角の概念図

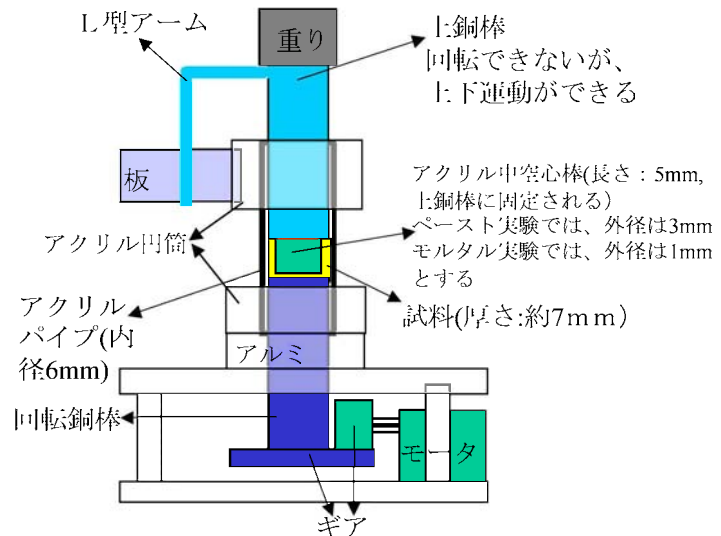
表 1. 用いた試料の調合と実験条件

試料	調合			アルミナ 粒度 ( $\mu\text{m}$ )	標準砂 の粒度 ( $\mu\text{m}$ )	試料容器 の内径 (mm)	心棒 直径 (mm)	撮影ステ ップ刻み (度)	露出 時間 (s)
	W/A (%)	S/A (体積比)	VMA (g/1 lit 試料)						
アルミナ-水-増粘 剤(ペースト)	33.3	-	100	75~105	-	6	3	0.2	6
標準砂-水-アルミ ナ(モルタル)	55.0	2.7	-	45~105	150~ 250	6	1	0.2	8

注：W：水、A：アルミナ、S：豊浦標準砂、VMA：増粘剤



(a) 実物写真



(b) コンセプト図

図 2. せん断試験装置

器の材質などの原因で画像が鮮明ではなかったため、粒子配列を考察することが出来なかった。

本研究では、水和反応がなく、鉱物成分(酸化アルミニウムが 99.6%以上)が単一であるアルミナ粒子によるペースト、モルタルを用いて、SPring-8 の産業利用ビームライン(BL19B2)を利用して、それらの粒子配列およびせん断変形に伴う変化を CT イメージングにて観察し、両者の関係を考察する。

## 2. 実験概要：

### 2.1 試料調合および実験条件

セメントの水和反応の影響を避けるために、今回の実験では平均粒径が  $70\mu\text{m}$  であるアルミナを分級したもの(粒度が  $45\sim 105\mu\text{m}$ )をセメントの代替材料として用いた。アルミナは、水酸化アルミニウムを焼成することによって製造した白色粉末結晶であり、密度が 3.96 であり、単独に水と混合すれば、水和反応を生じない。アルミナの化学成分は、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ -99.6%、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -0.01%、 $\text{SiO}_2$ -0.01%であった。また、粒度が  $150\sim 250\mu\text{m}$  の豊浦標準砂をモルタルの骨材として使用した。アルミナを用いたペーストとモルタルは、粘性があるため、粒子の移動挙動が、ポルトランドセメントを用いたペースト、モルタルと同じであると考えられる。したがって、アルミナと水による混合物の実験結果は、セメント系材料の粒子配列特性を反映できると思われる。

アルミナペーストとモルタル試料の調合と一部の実験条件を表 1 に示す。使用したビームラインのエネルギーは 30keV であった。

### 2.2 実験装置およびせん断変位

リングせん断実験装置を図 2 に示す。試料容器は、内径が 6mm の亚克力パイプであった。パイプの外径は亚克力製の円筒の内径と同じであった。予めパイプを上亚克力円筒に入れ、直径が

5.5mmの上銅棒をパイプの上端から挿入した後、ペーストやモルタル試料をパイプの下端から装入した。その後、パイプの下端を亚克力製の下円筒に挿入すると、モータのギアに接続し、下円筒に挿入していた回転銅棒(直径: 5.5mm)は、パイプの下端からパイプ内に入り、試料に緊密に接触した。試料の高さは約7mmであった。試料と回転銅棒の上端面の間にすべりを生じさせないように、回転銅棒の端面を凸凹した。また、試料にリングせん断を受けさせるために、長さが5mmの亚克力製の中空心棒を上銅棒の下端面に固定した。心棒の外径は、ペースト試料の場合には3mmであったが、モルタル試料の場合には1mmであった。上銅棒に繋いだL型アームが、亚克力製の上円筒の側面に固定した板にぶつかったため、上銅棒(重さ: 33g)は、回転できず、鉛直方向のみに移動できる。上銅棒の上に35gの重りをおく場合、試料がせん断される時に、68gfの垂直圧力を受けていた。

試料と銅棒をセッティングした後(せん断変位をゼロとする)、撮影を行った。その後、回転銅棒を18°ずつ手で回して、試料にリングせん断変形を生じさせた。試料のせん断角度は、ステップごとの回転棒の回転角を累加したものである。

図3に示すように、試料のせん断面は、鉛直円周面であり、各水平断面においては、心棒から離れるほど、円周方向のせん断変位は大きい。また、上銅棒の下端面から下にいけばいくほど、せん断変位は大きいと考えられる。

### 2.3 画像処理および粒子接点角の測定

表1に示す条件で回転角度別に撮影して、心棒の下端面以下0.5mmから下端面以上2mmまでの範囲における水平断面画像(図4参照)を再構成した後、心棒の表面から亚克力パイプの内壁面の間にある試料の鉛直円周断面画像を10個再構成した(図5参照)。

次に、構成したモルタルの鉛直円周断面画像をCAD上で開く、心棒下端面の位置においては水平線を引いて、基準位置とした。この水平基準線を跨る粒子とこの基準線以上の粒子との接点を見出し、粒子接点を通る粒子輪郭の接線を描いた。粒子輪郭の接線と水平基準線とのなす角度を粒子接点角とし、計測した(図5参照)。同一鉛直円周断面の粒子接点角の和を水平基準線上の粒子数で除して、回転角度・鉛直円周面ごとの平均粒子接点角を求めた。

### 3. 実験結果および考察:

アルミナペーストの水平断面の一例を図6に示す。同図に示すように、画像が鮮明であり、サイズが75~105 $\mu\text{m}$ のアルミナ粒子の位置と接点を確定することができる。粒子接点角を計測しており、計測結果およびそれとせん断変形との関係を別途に報告させていただく。

図7は、アルミナ粒子と標準砂を用いたモルタルの平均粒子接点角とせん断変位の関係を示すものである。粒子接点を通る粒子輪郭の接線を描く時に誤差が生じたため、平均粒子接点角とせん断変位の関係プロットには、ばらつきが大きかった。しかしながら、図6を見ると、平均粒子接点角は、せん断変位の増加に伴って最初に増大したが、あるせん断変位以上になると減少していく傾向が見られた。粒子接点角は大きいほど、粒子集合体の変形抵抗は大きいため、

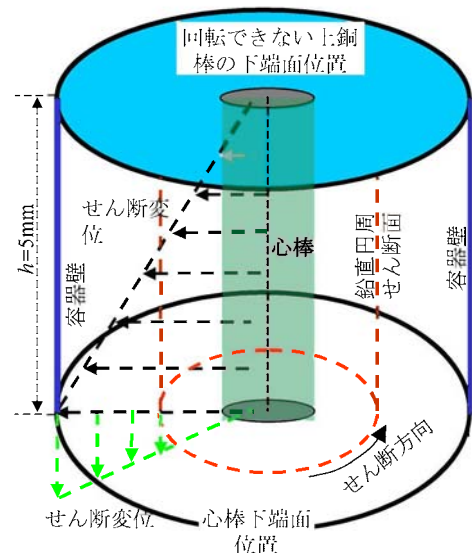


図3. せん断変位の位置依存性

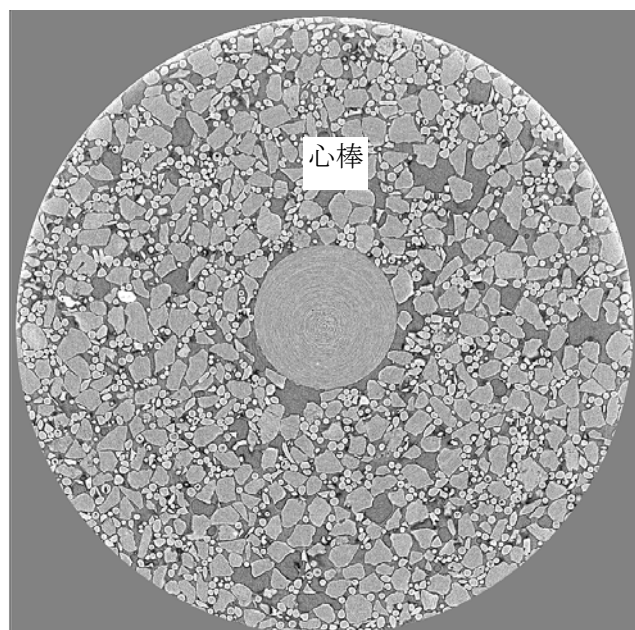


図4. モルタルの水平断面画像の一例(せん断角度63°)

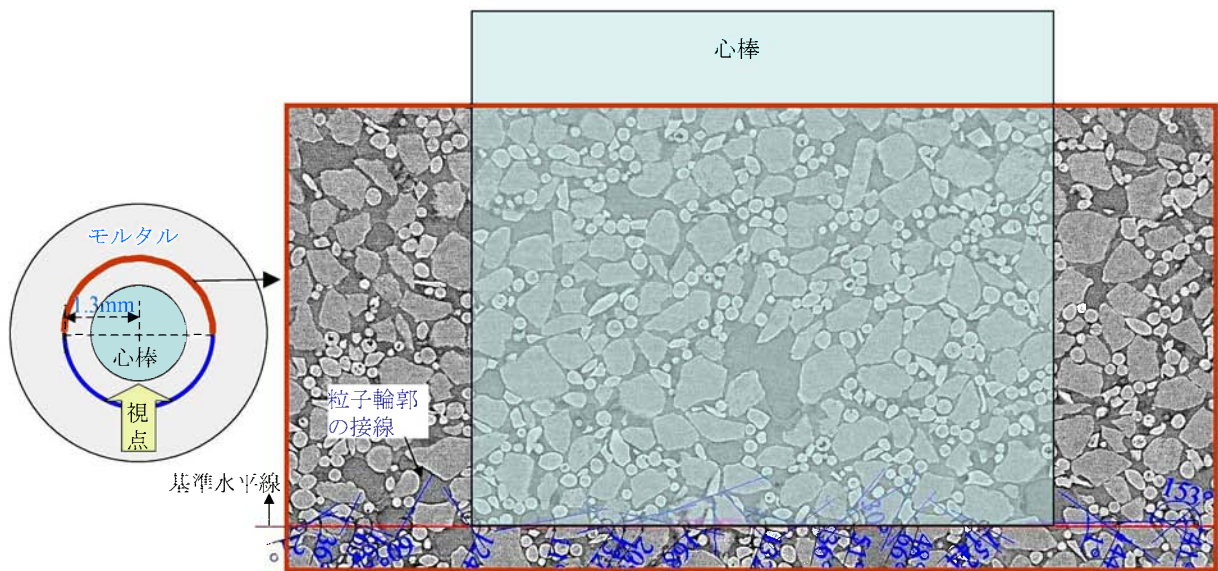


図5. モルタルの鉛直円周断面画像の一例(せん断角度  $63^\circ$ 、心棒中心から 1.3mm)

モルタルのせん断変形抵抗は、せん断の最初段階ではせん断変位の増大に伴って増大するが、ピーク値を超えると減少することが認められた。

#### 4. 結論および今後の課題：

本研究では、アルミナ粒子を用いたペーストとモルタルの内部構造を放射光 CT イメージングによって撮影した。いずれの試料でも、固体粒子の位置と粒子接点がよく見られ、モルタルの粒子接点角を計測して、平均粒子接点角とせん断変形との関係を考察した。平均粒子接点角は、せん断変位の増加に伴って最初に増大するが、あるせん断変形以上になると、減少していくことがわかった。しかし、粒子接点を通る粒子輪郭の接線を描く時に誤差が生じたため、今回の実験では平均粒子接点角とせん断変形との関係を精密に考察することができなかった。今後、粒子接点角を正確に計測するために、球状粒子を用いた試料を作製した上で、平均粒子接点角とせん断変形の関係及び試料の流動性、垂直圧力などの影響について詳細な考察を行うつもりである。

#### 参考文献：

- [1] 村山朔郎, 土の力学挙動の理論, 技報堂出版, pp.100-119, 1990
- [2] Z. Li, and J. Li: Granular material characteristic of fresh concrete, *Proc. of 6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Canada)*, pp.423-433, 2010.9.

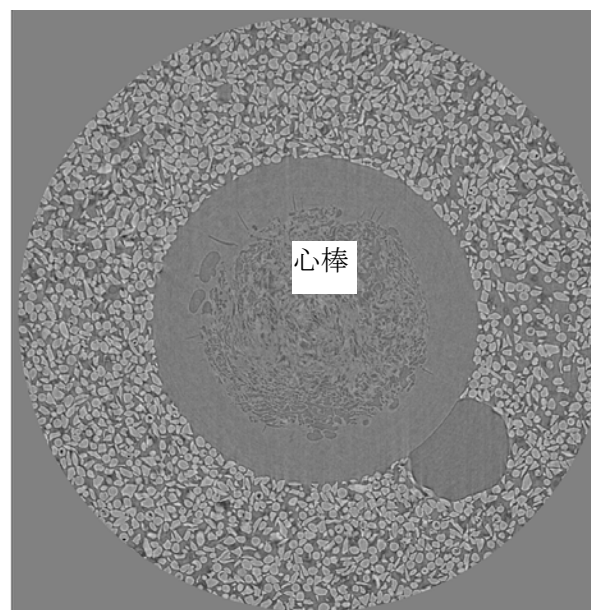


図6. アルミナペーストの水平断面画像例(せん断角度度:  $0^\circ$ )

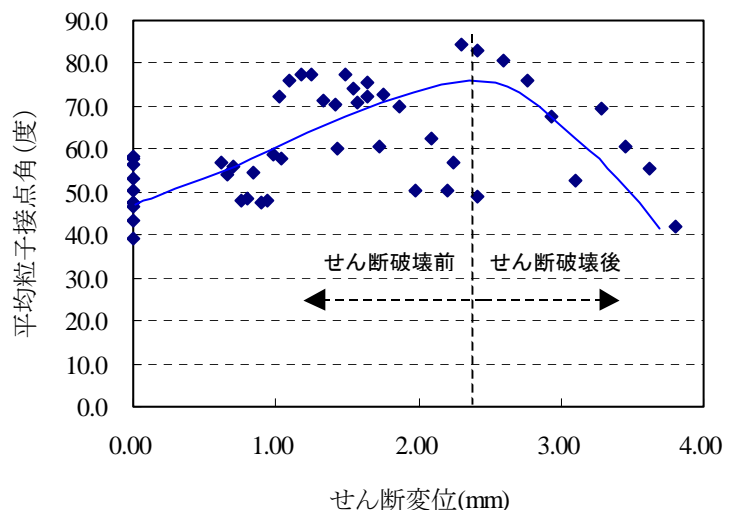


図7. モルタルの平均粒子接点角とせん断変位の関係