

フレッシュセメント系材料の粒子配列に関する研究 Investigation on Particle Fabric of Cementitious Materials in Fresh State

李 柱国^a, 李 潔勇^a
Zhuguo Li^a, Jieong Li^a

^a 山口大学
^a Yamaguchi University

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、フレッシュセメントペースト、フライアッシュペーストおよび乾燥豊浦標準砂-水-増粘剤の混合物の内部構造とせん断による変化を撮影した。画像分析によって、フレッシュセメント系材料のせん断による粒子接点角の変化を明らかにした。

キーワード： フレッシュセメント系材料、粒状体特性、標準砂、応力状態、粒子接点角、CTイメージング

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、施工したコンクリート構造物の強度と耐久性に大きな影響を与える。流動性は低すぎると、ポンプでの搬送できず、鉄筋の間に通過できず、充填性が低い。コンクリートの施工性能の合理化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にくい。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。筆者らは、既に Laser-Aided Tomography (LAT 法) による可視化実験を行い、モデル材料を利用してせん断変形に伴う骨材粒子の配列変化を考察した[2]。しかし、LAT 法は、セメントに適用できない。

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先行研究として、SPring-8の産業利用ビームライン(BL19B2)を利用して、フレッシュセメント系材料の粒子配列および変形・流動に伴う変化をCTイメージングにて観察し、粒子配列による流動抵抗のメカニズムを解明する。

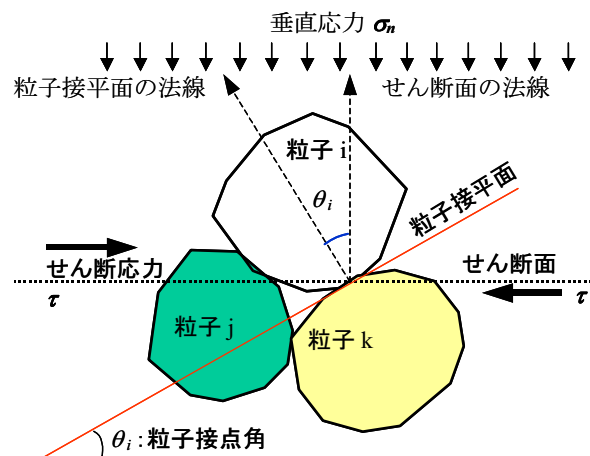


図1 粒子接点角の概念図

表 1 用いた試料の調合と実験条件

| 試料 | 調合 | | | | 粒度 (μm) | 試料の直 径(mm) | 撮影ステッ プ刻み(度) |
|---------------|------------|----------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------|---------------|-----------------|
| | W/B (%) | HP (B \times %) | SRA (B \times %) | VMA (g/1 lit 試料) | | | |
| セメントペースト | 31.6 | 2.7 | 2.2 | 13.9 | 75~100 | 2.8mm | 0.24 |
| フライアッシュペースト | 61.5 | 14.4 | - | 7.9 | 53~75 | 2.8mm | 1.00 |
| 標準砂-水-増粘剤ペースト | W/S=0.34 | | | 17.3 | 150~250 | 6.0mm | 0.24 |

注：W：水、B：分級普通ポルトランドセメントまたフライアッシュ、S：標準砂、HP：遅延型高性能減水剤、SRA：凝結遅延剤、VMA：増粘剤

実験概要：

今回の実験に用いたセメントは、普通ポルトランドセメントを分級したものであり、サイズが 20~53 μm 、53~75 μm および 75~100 μm の 3 種であった。フライアッシュは、セメントの代替材としてコンクリートによく使われ、単独に水と混合すれば、水和反応を生じない。セメントの水和反応の影響を避けるために、実験に乾燥フライアッシュおよびそれと水のペーストを使った。用いたフライアッシュのサイズは、53~75 μm および 150 μm ~250 μm の 2 種であった。後記のようにこれらの材料の CT 画像は不鮮明で、粒子配列の考察ができないため、サイズが 150~250 μm の豊浦標準砂と水、増粘剤のペーストで、せん断が粒子配列に与える影響を考察した。豊浦標準砂と水、増粘剤のペーストは、粘性があるため、粒子の移動特性が、粘性のあるセメントペーストと同じであると考えられる。したがって、砂-水-増粘剤のペーストによる実験結果は、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。

各種のペースト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放射光のエネルギーは 30keV や 25keV である。乾燥セメントとフライアッシュの試料容器の内径は 2.8mm であった。砂ペーストの実験では、内径が 6mm のアクリル容器を使った。試料の高さが 6mm であった。試料にリングせん断を受けさせるために、容器の中央に直径が 1.5mm の心棒を配置した。図 2 に示すように、stepping モータの駆動によって、回転棒が回転すると、容器に入れた試料がせん断されて、せん断力は、フリー棒と L 型アームを通じてロードセルで検出される。回転棒の回転速度と 1 回の最大回転角は、コントローラとパソコンで制御される。回転速度は 1.8 度/s であった。試料のせん断角度は、ステップごとの回転棒の最大回転角を累加したものである。試料がせん断されるときに、フリー棒による 33gf の垂直圧力を受けた。

実験結果および考察：

セメントペーストとフライアッシュペースト試料の水平断面の画像をそれぞれ図 3 と図 4 に示す。同図に示すように、画像が鮮明ではなく、粒子接点と位置を画像によって判断できない。セメントペーストの画像中央にある粒子が見えなかった。ペーストは容器の中央部に充填不良のためであろうと推測している。水や混和剤の影響があるかどうかを検討するために、乾燥セメントと乾燥フライアッシュを試料として撮影した。図 5 および図 6 はそれぞれ乾燥セメントとフライアッシュの水平断面画像である。乾燥粒子材料の断面画像も鮮明ではなかった。試料の直径と撮影ステップ刻みも過大であろうと考えている。また、セメントとフライアッシュの分級は不完全で、所定の粒度より小さい粒子が存在した事は、一つの原因であろうと思われる。しかし、この実験によって、フライアッシュ粒子の中空構造を観察できた(図 6 参照)。この中空構造形態は、フライアッシュ粒子材料の断面画像が不鮮明であるこ

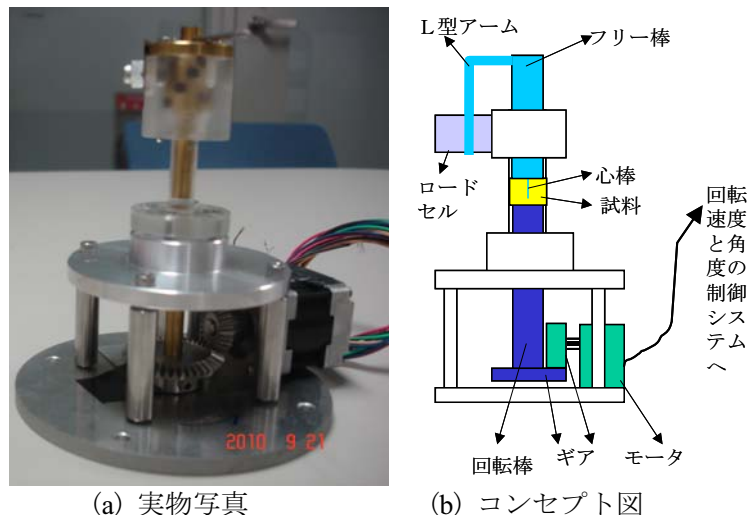


図 2 せん断試験装置

とをもたらすかもしれない。

図7に、標準砂-水-増粘剤の混合物の各せん断ステップにおける水平断面の画像を示す。水平断面の高さは、試料頂面から1.43mmである。これらの画像より砂粒子接点が認められたので、粒子接点角を求めることができた。

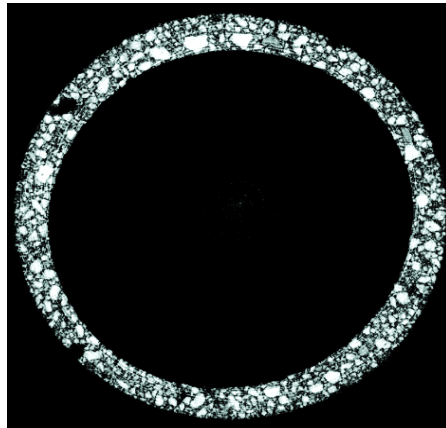


図3 セメントペースト

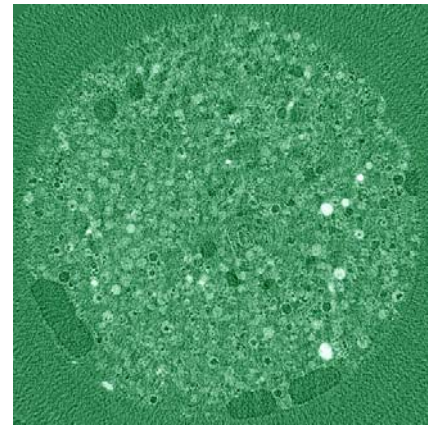


図4 フライアッシュペースト

粒子接点角を求めるために、まず水平断面画像を構成して、さらに水平断面を基に鉛直断面を構成した。図8に、構成した鉛直断面の例を示す。それぞれ円心と1/2半径の位置を通る鉛直断面である。パソコンの画像構成能力に制約されたため、鉛直断面の高さは、0.86mmしかないが、粒子接点角の計測と考察に支障がない。粒子接点角を計測するために、図8に示すように、

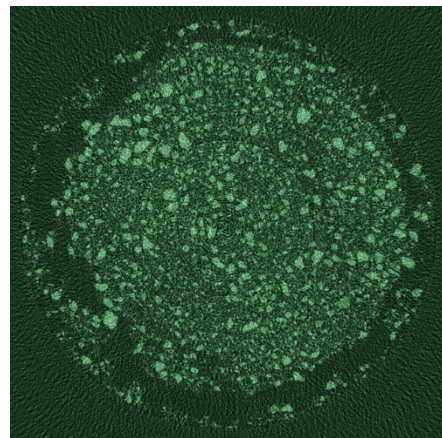


図5 乾燥セメント
(粒度: 53~75 μm)

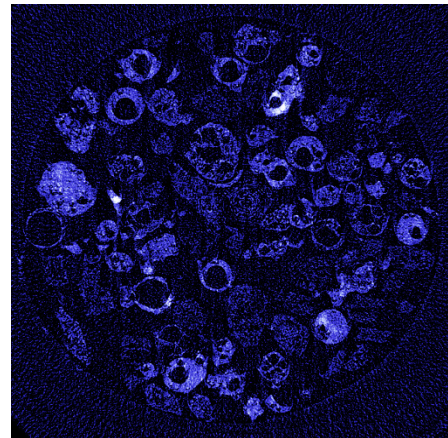


図6 乾燥フライアッシュ
(粒度: 150~250 μm)

(容器内径: 2.8mm, 放射光のエネルギー: 25keV, 撮影ステップ刻み: 1°)

鉛直画像をCADソフトウェアで開き、水平線を引いた。水平線を跨る粒子とその隣接粒子との接点を通る粒子表面の接線を描いた。接線と水平線のなす角度を粒子接点角とし、計測した。

図9に、中心鉛直断面と中間鉛直断面の総粒子接点角とせん断角度の関係を示す。同図に示すように、せん断角度の増加に伴って、総粒子接点角は、増大したが、あるせん断角度以上でせん断を行うと、減少していく傾向が見られた。つまり、せん断抵抗は、せん断の最初段階ではせん断ひずみの増大に伴って増大するが、最大値を超えると減少することが認められた。このせん断抵抗の最大値は、せん断破壊限界応力に対応すると考えられる。

結論および今後の課題：

本研究では、硬化前のセメントペーストとフライアッシュペースト、乾燥セメントとフライアッシュおよび砂-水-増粘剤の混合物の内部構造を放射光CTイメージングによって撮影した。過小粒子があり、試料サイズが過大であったため、セメントとフライアッシュの粒子をよく観察できなかった。しかし、砂-水-増粘剤の混合物中の粒子接点がよく見られ、粒子接点角とせん断角度の関係を考察した。せん断角度の増加に伴って、総粒子接点角は、増大するが、あるせん断角度以上になると、減少していくことを明らかにした。今後、セメントをしっかりと分級して粒径を50~70 μmとし、試料サイズを1.5mm以下にして、放射光CTイメージング実験を行うことによって、セメント粒子の内部構造およびせん断変形に伴う変化を考察すると希望している。

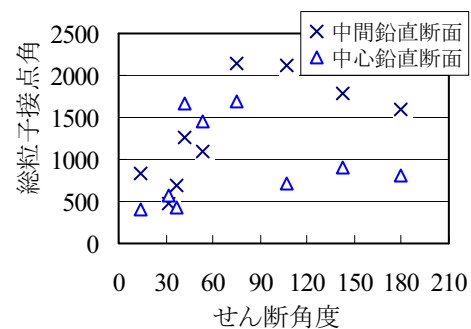


図9 総粒子接点角とせん断角度の関係

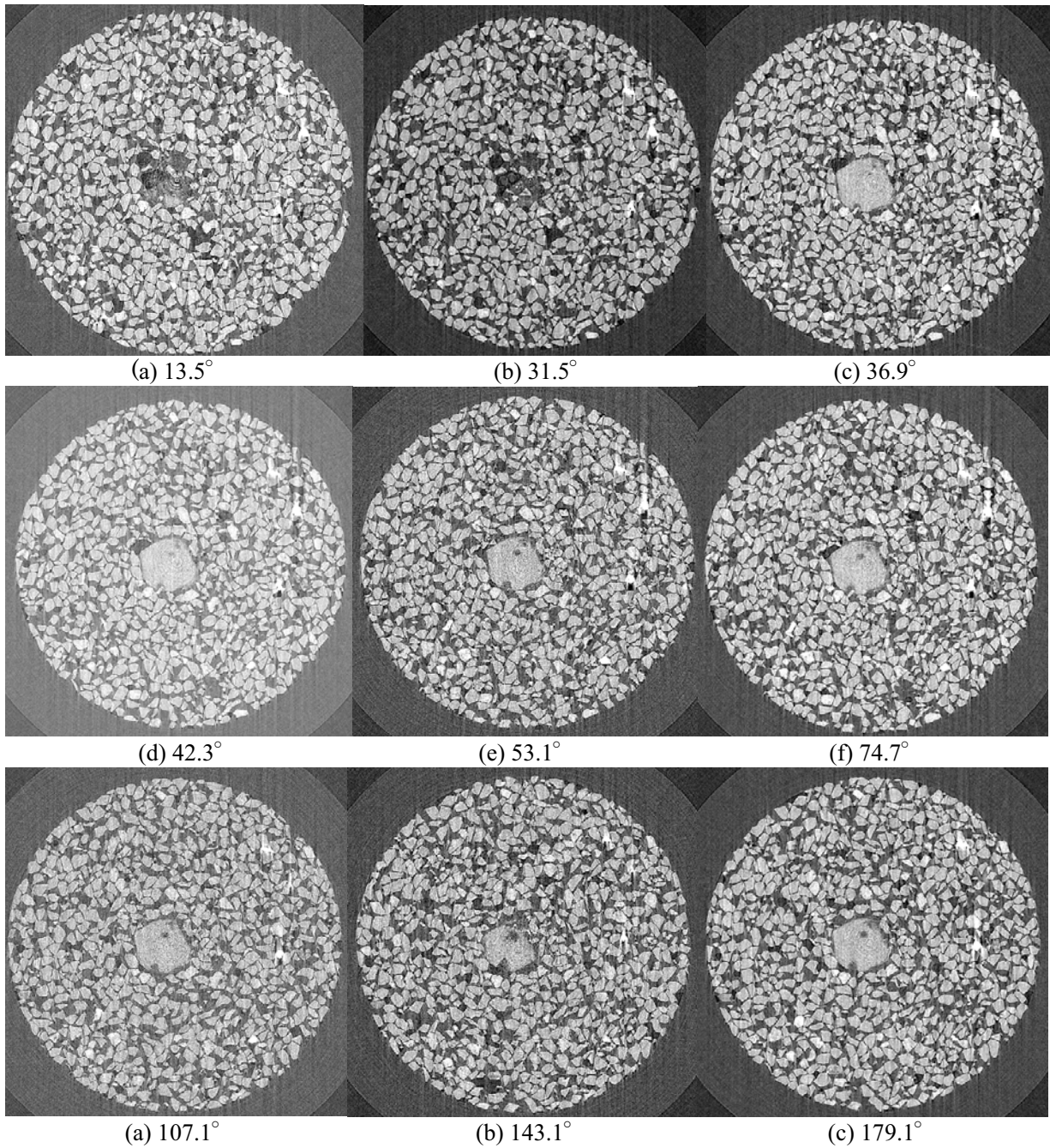
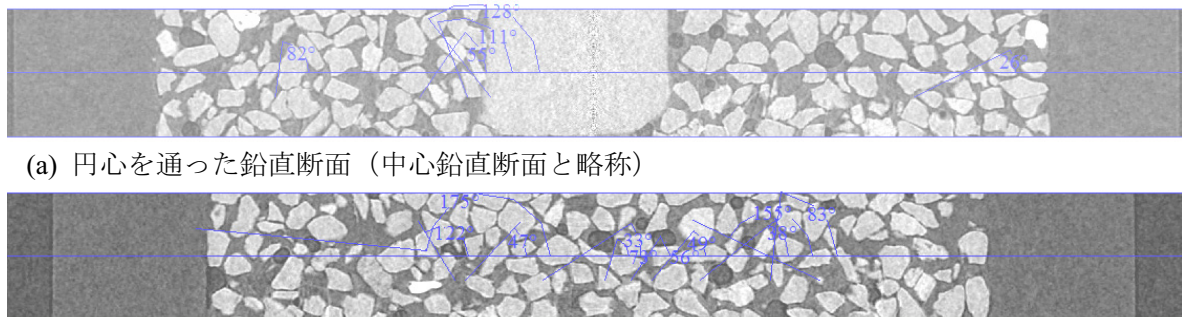


図7 各せん断ステップにおける砂-水-増粘剤の混合物の水平断面画像



(a) 円心を通った鉛直断面（中心鉛直断面と略称）

(b) 1/2半径の位置を通った鉛直断面（中間鉛直断面と略称）

図8 鉛直断面画像および粒子接点の求め方

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] 李柱国・飯高稔, 日本建築学会中国支部研究報告集, Vol.32, No.109, pp.1-4, 2009