

フレッシュコンクリートの微視的構造と粒子挙動の解明 Microscopic Structure and Particle Behavior of Fresh Concrete

李 柱国^a, 三島 直生^b, 李 潔勇^a
Zhuguo Li^a, Naoki Mishima^b, Jieong Li^a

^a 山口大学, ^b 三重大学
^a Yamaguchi University, ^b Mie 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乾燥豊浦標準砂、フレッシュモルタルおよびセメントペーストの内部構造および振動や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や振動による粒子の凝集・分散と正負ダイラタンシー現象を検証し、変形・流動の過程では粒子分布変化による変形抵抗性の不安定性を明らかにした。

キーワード： フレッシュコンクリート、粒状体特性、ダイラタンシー、応力状態、X線CT

背景と研究目的：

コンクリート構造物の高品質化、長寿命化が求められている現在、コンクリート施工の高品質化と合理化が極めて重要である。建物の大型化・高層化および鉄筋配置の高密度化のため、コンクリートの打設が困難になっている。このため、コンクリート施工性能の設定と適合性判定は、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、ポンプ圧送および打ち込みなどの数値シミュレーションに基づいたコンクリートの施工性能の評価と最適化は極めて必要となる。コンクリートの施工過程のシミュレーションを行うために、その流動抵抗に関するレオロジーモデルの構築が不可欠である。

フレッシュコンクリートの組成の8割以上が粒子材料（セメントと骨材）であるため、粒子集合体として扱われるべきである。つまり、粒子間の摩擦抵抗およびダイラタンシーによる抵抗などの粒状体特性を無視できない。流体と粒状体の二重特性がまだ系統的・定量的に把握されていないため、流動抵抗性モデルが正確に構築されていない。

粒子集合体の変形・流動抵抗が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]。セメント系材料が不透明な材料であり、かつセメント粒子と砂粒子が小さいため、通常のX線CT装置によって砂とセメントの粒子接点を観察することはほとんど不可能である。モデル材料を利用してコンクリートの圧送流動を可視化する実験が報告されている[2]が、その微視的構造および粒子接点角の外力に伴う変化に関する考察はまだ見当たらない。著者らは、Laser-Aided Tomography (LAT法)による可視化実験を行い、サイズが5~10mmのガラス粒子とシリコンオイルの混合物を対象として、せん断変形と振動に伴う粒子接点角の変化を考察した[3],[4]。しかし、LAT法は、微粒子が存在する真のセメント系材料に適用できない。

そこで、本研究では、SPring-8の産業利用ビームラインBL19B2を利用して、フレッシュコンクリートの微視的構造（粒子配列）および応力状態に伴う変化をX線CT法により観察し、粒状体特性と流動抵抗のメカニズムを解明する。

実験概要：

微小なセメント粒子を観察するために、試料のサイズが限られた。また、モルタルやセメントペーストの粒状体特性は、フレッシュコンクリートとほぼ同じであるため、今回実験ではフレッシュモルタルとセメントペーストを使用した。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10 μ m以上であった。表1に使用した試料の調合と実験条件を示す。また、試料のサイズを小さくしても、セメント粒子をよく観察できないかもしれないと考えて、念のために、実験では乾燥豊浦標準砂も試料とした。

表 1. 用いた試料の調合と実験条件

応力状態	試料	調合					試料の直径 (mm)	撮影ステップ刻み (度)
		W/C (%)	S/C	HP (C×%)	SRA (C×%)	AFK (g/1 lit 試料)		
振動	フレッシュモルタル	34.8	1.34	0	0.3	0.1	6.0mm	0.1
	セメントペースト	30.0	0	1.8	0.3	0.1	2.8mm	0.2
せん断	乾燥豊浦標準砂	通過重量百分率 (%): ふるい寸法(μm) 850→100%, 125→99.98%, 250→90.58%, 106→0.69%, 75→0.24%					6.0mm	0.24

注：W：水、C：分級普通ポルトランドセメント、S：標準砂、HP：高性能減水剤、SRA：凝結遅延剤、AFK：消泡剤

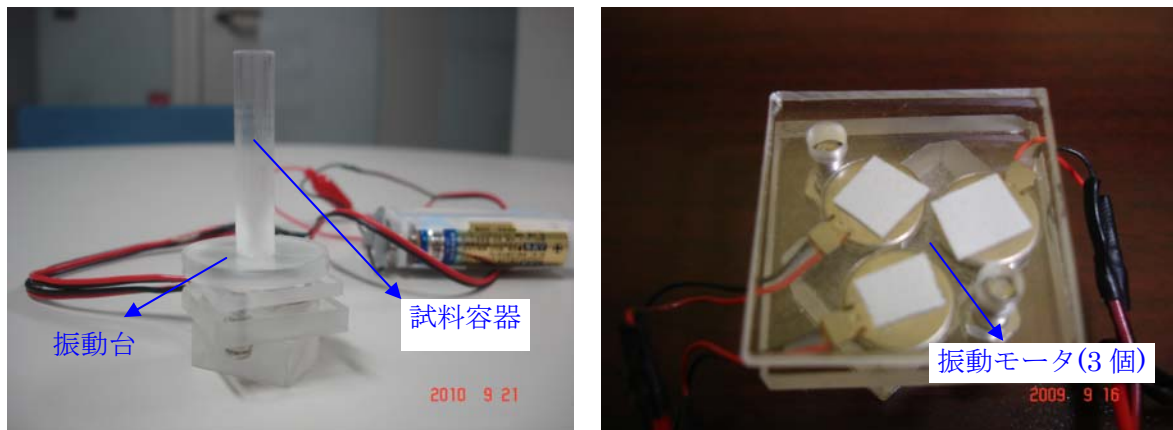


図 1. 振動モータによる微小振動台

振動実験に使われた微小振動台を図 1 に示す。また、セメントペーストと砂のせん断実験に用いた装置を図 2 に示す。使用したビームラインの放射光のエネルギーは 33keV であった。

結果および考察：

図 3 は、振動前後における直径が 6mm のフレッシュモルタル試料の同じ位置にある水平断面の画像である。砂粒子はよく見えるが、分級セメント粒子をよく見えないので、振動が粒子配列に与える影響は考察できない。

図 4 に、せん断と振動を受けたフレッシュセメントペーストの同じ位置にある水平断面の画像を示す。セメント粒子の形状がよく見えないため、粒子配列のせん断や振動による変化を定量的に考察できない。しかし、図 4 (b) に示すように、充填がゆるいセメントペースト試料は、せん断を受けると、粒子が最初に移動して互いに接近して緻密になった。このため、充填不足による試料中の空隙が拡大した。これは、せん断による負のダイラタンシーによる現象ではないかと考えられる。しかし、試料をさらにせん断すると、図 4 (c) に示すように、空隙が小さくなり、粒子の配列変化による正のダイラタンシー（体積膨張）が観察された。図 4 (d) は、図 4 (c) に示すせん断された試料を 60 s 間振動した後の断面画像である。振動を加えるとき、粒子が分散すると考えられるが、振動の後、試料が緻密になることが図 4 (d) によって認められた。試料がアクリル容器の内壁に密に付着して試料中の空隙が大きくなった。これによって、振動された試料の変形・流動抵抗が大きくなると推測できる。

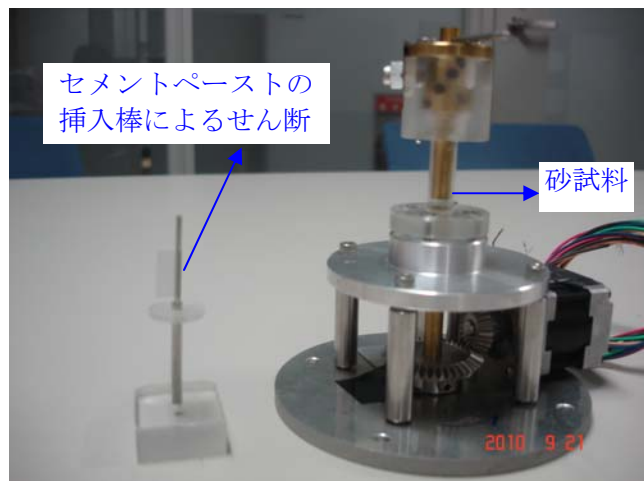


図 2. せん断試験装置

図5は、乾燥豊浦標準砂のせん断前後の同一位置にある水平断面画像である。同図によれば、せん断角度が 27° まで、粒子の分布がせん断に伴って密になる傾向が見られた。しかし、さらにせん断すると、粒子の間隔が拡大されて、体積膨張が発生したことが認められた。これは、前に述べたように、ゆるい粒状体材料の正・負のダイラタンシー現象である。これによって、砂を含むフレッシュコンクリートは、せん断によって正・負のダイラタンシーが発生すると推測できる。

結論および今後の課題：

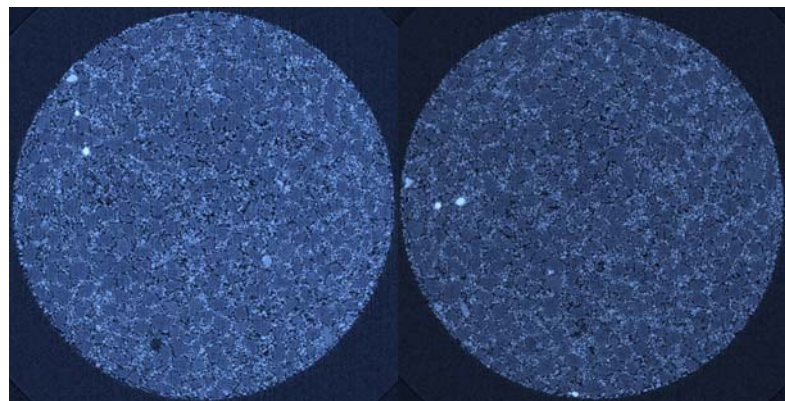
本研究では、せん断や振動を加える前後において、硬化前のモルタル、セメントペーストおよび乾燥砂の粒子配列の変化についてX線CTイメージングによって考察を行った。得られた主な知見が以下のようにまとめられる。

- 1) フレッシュセメント系材料に、他の粒状体材料と同じように、せん断変形に伴って正・負のダイラタンシーが発生する。
- 2) フレッシュセメント系材料は、振動を受けた後、粒子の分散が維持されず、逆に分布が密になり、変形流動抵抗が大きくなる。
- 3) 試料サイズが3mm程度ならば、エネルギーが33keVであるビームラインでセメント粒子をよく観察できない。

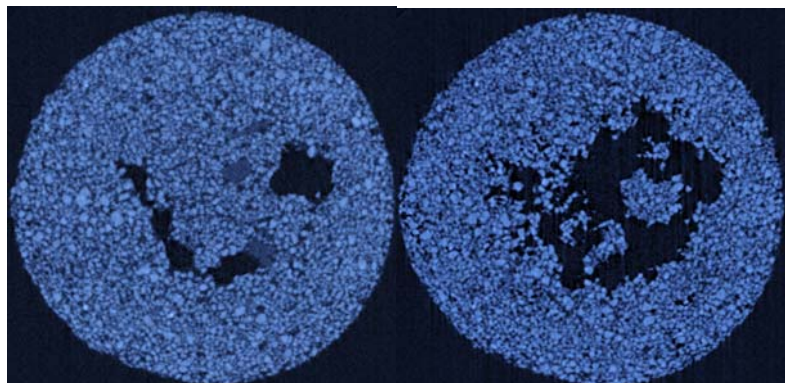
得られた砂の断面画像に対して、さらにせん断による粒子配列の変化を粒子接点角によって定量的に評価し、変形に伴う粒状体材料の変形抵抗の変化をモデル化する予定である。今後、分解能が高いビームラインを利用して、セメントペーストやモルタルの粒子配列の振動とせん断による変化を考察することを希望している。

参考文献：

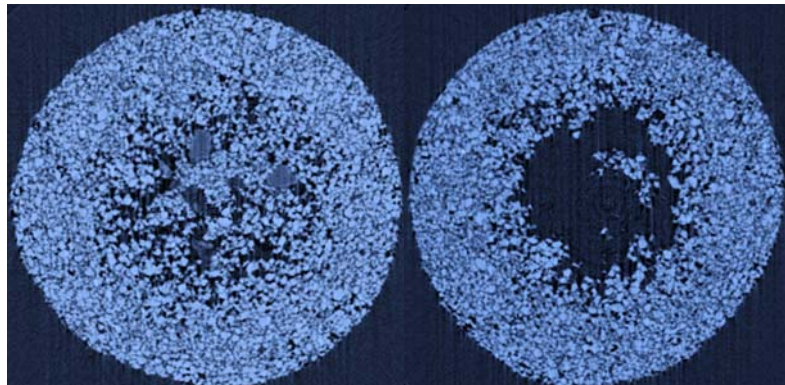
- [1] 村山朔郎, 土の力学挙動の理論, 技報堂出版, 1990, pp.100-119
- [2] 橋本親典ほか, コンクリート年次論文集, 10 (2), 79-84, (1988)
- [3] 李柱国・飯高稔, 日本建築学会中国支部研究報告集, 32 (109), 1-4, (2009)
- [4] 李柱国・張文博・飯高稔, 日本建築学会中国支部研究報告集, 33 (109), 1-4, (2010)



(a) 振動前 (b) 20秒間振動後
図3. 振動前後のフレッシュモルタルの断面画像



(a) せん断前 (b) 20° せん断後



(c) 60° せん断後 (d) 60秒間振動後

図4. せん断、振動前後のフレッシュセメントペーストの断面画像

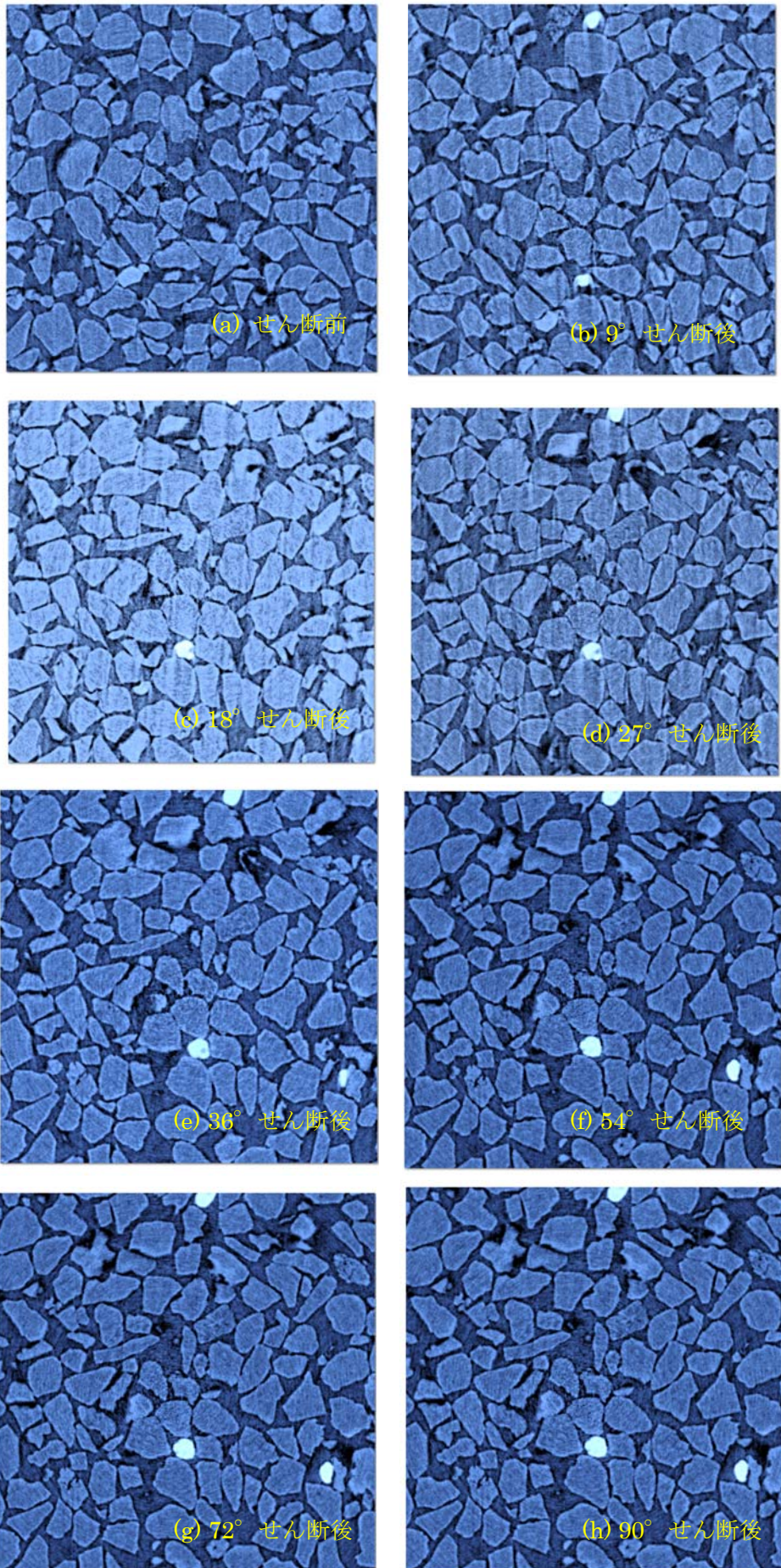


図 5. 乾燥豊浦標準砂のせん断前後の同一位置にある水平断面画像