放射光 CT イメージングを用いたフレッシュコンクリートの 粒子接点角に関する考察[†]

李 柱 国^{*} 梶 原 堅太郎^{**} 飯 高 稔^{***}

Investigation on Particle Contact Angle of Fresh Concrete Using X-ray CT Imaging

by

Zhuguo Li^{*}, Kentaro KAJIWARA^{**} and Minoru IIDAKA^{***}

It is important to clarify the variation of particle contact angle of fresh concrete with shear deformation for understanding its deformation resistance and mechanical behaviors. In this study, using X-ray CT imaging, the authors investigated mean particle contact angles (θ) of fresh mortar before and after sheared in a ring shear device, which was composed of alumina powder, sand, and water, etc. As a result, the mean particle contact angle increases with increasing the shear deformation, but when reaching a peak, it decreases with the shear deformation. The increase and the decrease of θ are respectively the characteristics before and in shear failure state. Also, the greater the vertical stress on the shear plane, the smaller the increase or decrease of θ with the shear deformation.

Key words : Fresh concrete, Particle contact angle, Shear deformation, Vertical stress, X-ray CT imaging, Synchrotron radiation

1 緒 言

フレッシュコンクリートは、水と粒径が数 μm ～数 cm の固体粒子によって構成されるものであるため、特殊な含水粒子材料とみなすことができ、粘性流体と粒状体の二重の性質をもっている。Alexandridis ら¹⁾は、実験結果を基に、フレッシュコンクリートのせん断強さが内部摩擦角、粒子接点角および粘性によって決定され、Rowe 理論式で表現できると指摘している。したがって、フレッシュコンクリートの施工性能を支配する流動抵抗は、流体としての粘性抵抗と粒状体としての粒子滑動抵抗を含むと考えられる。

粒子滑動抵抗は、粒子の内部摩擦と粒子配列に起因して、滑動抵抗角（粒子接点角と内部摩擦角の和）に依存する。²⁾粒子接点角の概念を Fig. 1 に示す。山本ら³⁾は、平均粒子接点角が粒状体の構造を代表し、せん断変形に伴う平均粒子接点角の変化が粒状体のせん断時の応力-ひずみ関係を支配すると報告している。現在、ほとんどの研究は、フレッシュコンクリートを均質な粘性流体やサスペンション体として取り扱っている。⁴⁾フレッシュコンクリートの変形・流動は、それぞれそのせん断破壊前後の挙動と考えられ、変形・流動性質を正確に解明し、モデル化するためには、せん断破壊前後の粒状体特性を明らかにすることが不可欠である。⁵⁾

村山の粒子集合体理論²⁾によれば、土などの粒子集合体のせん断変形が式 (1) に示すように個々の粒子の移動に起因し、粒子接点角に大きく依存する。Li ら⁶⁾は、こ

Fig. 1 Concept of particle contact angle.

の理論がフレッシュコンクリートにも適用しうると報告している。

$$\gamma = \sum_{i=1}^n A_i \cos \theta_i / L_0 \quad (1)$$

ここに、 γ : せん断ひずみ、 n : 移動粒子数、 A_i : 粒子移動距離、 θ_i : 粒子接点角、 L_0 : 単位長さ (= 1)

Matsuoka⁷⁾ は、理論考察によって、粒子材料のせん断・垂直応力比、垂直・せん断ひずみ比と平均粒子接点角との関係を式 (2) に示すように提案し、粒子接点角が大きいほど、せん断・垂直応力比と垂直・せん断ひずみ比は大きいと指摘している。さらに、各種の直径のアルミの丸棒（小円柱）を積み重ねた 2 次元積層体を用いた単

[†] 原稿受理 平成 24 年 9 月 10 日 Received Sep. 10, 2012 ©2013 The Society of Materials Science, Japan

^{*} 山口大学大学院理工学研究科 〒755-8611 宇部市常盤台, Graduate School of Sci., & Eng., Yamaguchi Univ., Tokiwadai, Ube, 755-8611

^{**} (財) 高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都, Japan Synchrotron Radiation Res. Inst., Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

^{***} 筑波大学大学院システム情報研究科 〒305-8577 つくば市天王台, Graduate School of Systems and Information Eng., Univ. of Tsukuba, Tennodai, Tsukuba, 305-8577

純せん断実験の結果によって、平均粒子接点角は、ピーク値に達するまではせん断変形の増加に伴って増大するが、ピーク値以降では、せん断変形と共に減少していくことを明らかにした (Fig. 2 参照)。

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan(\theta + \phi), \quad -\frac{d\epsilon}{d\gamma} \cong \tan \theta \quad (2)$$

ここに、 τ : せん断力, σ_n : 垂直応力, ϕ : 平均内部摩擦角, θ : 平均粒子接点角, ϵ : 垂直ひずみ

しかし、アルミ棒の断面の寸法、形状および表面摩擦は自然の粒子と異なる。特に便宜的に用いられた円柱形のアルミ棒の接点が常に円柱面上にあって、自然の粒子のような接点部近傍の不規則性を必ずしも再現しているとはいえない。村山ら⁸⁾は、上記の問題点を指摘した上で、砂の一面せん断実験を行った。せん断箱の透明なアクリル側板付近にある砂粒子を水平変位ステップごとに撮影して、個々の砂粒子の垂直方向と水平方向における移動距離を計測し、粒子移動方向角 (粒子接点角ではない) を求めた。また、撮影された砂粒子は、容器壁面付近にあり、その移動が摩擦の影響を受けるため、実験結果の信頼性が疑われている。

李・谷川⁹⁾は、Konagai らが開発した3次元粒体の可視化実験手法¹⁰⁾—LAT (Laser-Aided Tomography) を用いて、一面せん断を受けたガラス粒子—シリコンオイル混合物の平均粒子接点角とせん断応力、垂直応力、せん断変形との関係をそれぞれ考察した。得られた平均粒子接点角とせん断変形の関係傾向はほぼ Fig. 2 と同じであった。しかし、ガラス粒子—シリコンオイル混合物が粘塑性材料ではないため、実験結果はフレッシュコンクリートや土などの粘性材料の粒子挙動を反映できるかどうか不明である。また、粒子材料の一面せん断試験の場合、せん断層が生じるが、2次元の平面せん断に近い状態であると考えられる。

したがって、平均粒子接点角は、粒子材料の変形とせん断抵抗を支配するが、せん断変形に伴うその変化がまだ明らかになっていない。本研究では、この背景を踏まえて、フレッシュコンクリートの変形・流動状態における粒子接点角の変化を明らかにすることを目的として、粘塑性粒子材料のリングせん断試験を行い、日本の大型放射光施設 (SPring-8) のX線CTイメージングに

よって、粒子の平均粒子接点角の変化を考察し、試料の軟らかさとせん断面上の垂直圧力の影響を検討する。

2 実験概要

2・1 用いた試料および実験条件

セメントの水和反応の影響を回避するために、今回の実験では粒度分布が45~105 μm のアルミナ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の焼成で製造した白色粉末結晶 (密度: 3.96g/cm³) である。その主化学成分は、Al₂O₃-99.6%, Fe₂O₃-0.01%, SiO₂-0.01% である。アルミナを水と混合しても、水和反応が生じない。X線イメージングによって粗骨材粒子からセメント粒子までの広範囲の粒子を同時に観察することができない。そこで、本研究ではフレッシュコンクリートの代わりに、分級された乾燥豊浦砂、水およびアルミナからなる試料 (ここに、アルミナモルタルと呼ぶことにする) を使用した。アルミナモルタルは、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通常のもルタルと同じであると考えられる。したがって、アルミナモルタルの可視化実験の結果は、フレッシュモルタルの粒子挙動を反映できると思われる。

フレッシュコンクリート中の粗骨材粒子と細骨材粒子は寸法が異なるが、それらの移動、粒子間力の支持・伝達、他の粒子との接触などの挙動は基本的には同じであると考えられる。また、粒子が大きいほど、周りの粒子との接点は多く、まわりの粒子からの移動抵抗が大きくなる。2・3節に述べるように、平均粒子接点角 (θ) は、粒子あたりの粒子接点角とされているため、粒子寸法の影響を反映できるものである。せん断抵抗がモルタルより大きいコンクリートの θ は大きい。したがって、フレッシュモルタルの θ はフレッシュコンクリートと同じではないが、モルタルの実験によって得られた θ の変化傾向はフレッシュコンクリートにも適用できるものと考えられる。

実験過程ではブリーディングと粒子沈降分離が生じないようにするために、流動性が低いアルミナモルタル試料を使用した。2種類のアルミナモルタル試料の調査を Table 1 に示す。減水剤を添加したシリーズ H の流動性は、減水剤を無添加したシリーズ N より若干高かった。しかし、流動性が低いこれらの粘塑性試料の粘度は、通常の粘度計で測定できないため、不明である。

実験は大型放射光施設 SPring-8 の産業利用ビームライン BL19B2 で行った。試料の粒子が最も識別しやすくなるように、予備測定の結果に基づいて、X線のエネルギー

Fig. 2 Relation between θ and shear deformation angle.⁹⁾

Table 1 Mix proportions of alumina mortars.

No.	Size distribution of alumina particles (%)			Particle size of sand	Mix proportions			Flow value (mm)
	45~53 μm	53~75 μm	75~105 μm		W/A	S/A	SP (A×%)	
N	7.2	53.4	39.5	150~250 μm	0.55	2.7	0	135
H					0.27	0.9	5.5	190

Notes: W/A is water (W)-alumina (A) ratio by mass, S/A is sand (S)-alumina ratio by volume, SP is dosage of AE super-plasticizer.

Fig. 3 Ring shear device and shear deformation of sample.

は 30keV とし、撮影は 0.2 度刻みで行った。X 線検出器は浜松ホトニクス社製の CCD カメラ (C4880-41S) とイメージングユニット (M11427-42) を組み合わせたものを使用した。その分解能は測定していない。測定画像の画素サイズは 1.35 ミクロンであった。

また、CCD カメラが飽和しない最長の露光時間は 8 秒であった。試料 N の測定では露出時間を 8 秒とした。測定時間を短縮するために、試料 H の観察は露出時間を 6 秒としたが、明確な画質の劣化は見られなかった。

2・2 実験装置と実験方法

粒子材料がせん断されると、粒子接点角が存在するため、ダイレイタンスが発生する。ダイレイタンスが一旦拘束されると、粒子が移動しにくくなり、せん断抵抗は増大する。¹¹⁾ダイレイタンスが粒子移動に与える影響を生じさせないために、せん断面が水平面となるリングせん断実験を行った。リングせん断実験装置を Fig. 3 に示す。

Fig. 3 (b) に示すように、試料容器は、内径と外径がそれぞれ 6mm と 8mm のアクリルパイプ (acrylic pipe) とした。アクリルパイプの上下端を二つのアクリル製円筒 (acrylic cylinder、内径：8mm) に挿入して接着剤で固定した。アクリル製の中空心棒 (acrylic central hollow rod、寸法：外径 1mm × 長さ 5mm、X 線の吸収量を低減するために中空にした) を端面に固定しておいた上銅棒 (upward copper rod、直径：5.5mm) を容器パイプの上端から挿入した後、モルタル試料を容器パイプの下端から装入了。その後、アクリル製の下円筒をアルミ円板 (aluminum cylinder、中心に直径が 6mm の孔あり) にボルトで固定した。そして、モータのギアに接続しておいた回転銅棒 (revolving copper rod、直径：5.5mm) は、容器パイプの下端から容器内に挿入し、試料にくっついた。試料全体の高さは約 7mm であった。

銅棒の端面に試料のすべりが生じさせないように、端面を凸凹にした。上銅棒に繋いだ L 型アーム (L-shaped

bracket) が、アクリル製上円筒の側面に固定したアルミ板 (aluminum plate) に接触したため、上銅棒 (重さ：33g) は、回転できず、上下移動のみができる。このため、ダイレイタンス変形が拘束されない。上銅棒の上に 35g と 150g の重り載せることによって、試料にそれぞれ 0.024Pa と 0.065Pa の垂直圧力を加えた。

試料と銅棒をセッティングした後、せん断前の状態に対して撮影を行った。その後、回転銅棒を 18° または 27° ずつ回転して、試料にせん断変形を生じさせた。

試料のせん断状態を Fig. 3 (c) に示す。中空心棒以下の試料はねじりせん断を受けるが、心棒両側の試料 (高さ 5mm) はリングせん断を受け、せん断面は水平面である。上銅棒の下端面に対する各水平試料層のせん断変位は異なる。上銅棒の下端面から下方へ行けばいくほど、せん断変位は大きく、心棒下端面の位置にある試料のせん断変位が最も大きい。回転銅棒の回転角の増加に伴って、鉛直方向における各層試料のせん断変位は大きくなる。また、回転角が同じであっても、各水平面における試料が心棒から離れるほど、その円周位置のせん断変位は大きい。Table 2 に、回転銅棒の回転による各円周位置のせん断変位を示す。

2・3 画像処理および粒子接点角の測定

回転銅棒の回転角別に撮影して、中空心棒の下端面上下 2mm ~ -0.5mm の範囲における水平断面画像を再構成した。水平断面画像の一例を Fig. 4 に示す。次に、再構成した水平断面画像を基に、中空心棒の表面とアクリル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。10 個の円周断面は、中空心棒の表面より 0.8mm の位置から 0.1mm おきにある。Fig. 5 は、鉛直円周断面画像の一例である。

さらに、再構成したアルミナモルタルの鉛直円周断面画像を Auto CAD 上で開き、粒子接点角を計測する水平基準位置を選定した。選ばれた基準位置は、中空心棒の下端面と下端面上方 1mm の高さであった。次に、基準

位置に引いた水平基準線 (reference horizontal line) を跨ぐ粒子とこの基準線以上の粒子との接点を見出し、粒子接点の付近の粒子輪郭を円弧形と見なしてその接線を引いた。さらに、粒子輪郭の接線 (tangent of particle's contour) と水平基準線とのなす角度を粒子接点角とし、計測した (Fig. 5 参照)。

計測した粒子接点角

の和を水平基準線上の粒子数で除して、各鉛直円周面位置の平均粒子接点角 (θ) を求めた。

画像の再構成によって、アルミナモルタルの3次元構造を再現し、粒子接点角を3次元的に考察するのが理想的である。この場合、粒子接点角は、粒子接平面とせん断面のなす角度である。しかし、3次元構造内部にある粒子接点が見えないため、粒子接点角が測定できない。したがって、前述のように、Fig. 5 のような平面画像を利用して、粒子輪郭の接線と水平基準線 (リングせん断の場合、せん断面は水平面であるため) のなす角度を粒子接点角として求めて、粒子接点角を2次元的に考察した。

3 実験結果および考察

3・1 平均粒子接点角とせん断変位の関係

回転銅棒の回転角の増加に伴って、中空心棒の下端面の高さにおける各円周位置 (心棒中心からの距離 (半径) で円周の位置を表す) のせん断変位は Table 2 に示すように増加する。各円周位置の θ とせん断変位 (S_d) の関係を Fig. 6 に示す。図面の煩雑さを避けるために、半径が 1.7 と 1.8mm の円周位置だけの θ と S_d の関係についてグラフを描いた。同図に示すように、いずれの円周位置の θ は、 S_d の増加に伴って増大するが、ピーク値に達すると、逆に減少する。この変化傾向は、Matsuoka の実験結果 (Fig. 2 参照) と一致している。しかし、減少段階以降には、半径が 2.2mm の円周位置を除き、 θ は再び増

Table 2 Shear deformation at the location of each circle on the level of the center hollow rod's lower end. (Unit : mm)

r (mm)	Rotating angle of revolving rod (deg.)					
	27	36	45	63	72	90
1.3	0.61	0.82	1.02	1.43	1.63	2.04
1.4	0.66	0.88	1.10	1.54	1.76	2.20
1.5	0.71	0.94	1.18	1.65	1.88	2.36
1.6	0.75	1.00	1.26	1.76	2.01	2.51
1.7	0.80	1.07	1.33	1.87	2.14	2.67
1.8	0.85	1.13	1.41	1.98	2.26	2.83
1.9	0.89	1.19	1.49	2.09	2.39	2.98
2.0	0.94	1.26	1.57	2.20	2.51	3.14
2.1	0.99	1.32	1.65	2.31	2.64	3.30
2.2	1.04	1.38	1.73	2.42	2.76	3.45

Note: r is radius of circumference, i.e. distance from the center of the central hollow rod.

Fig. 4 One of the images of cross section of mortar N. (Rotating angle of the revolving rod : 63deg., vertical pressure : 0.024Pa, location of cross section : the lower end of the central hollow rod)

加する傾向が見られた。つまり、粒子接点角は S_d に伴って増加する限界があり、この限界を超えると減少する。

試料は単純なせん断変形・流動を自由に生じることができれば、 θ の減少に伴って、粒子噛み合いは徐々にゆるくなり、試料の形は崩れて、 θ はさらに減少していくと考えられる。²⁾しかし、今回のリングせん断実験では、試料は一定の形を維持するため、粒子の移動が一定の空間に拘束され、粒子の噛み合いがゆるくなる限度が存在する。このため、粒子の移動に伴って、粒子の噛み合いの程度が再び増大する。したがって、平均粒子接点角は、減少段階以降では2回目の増加段階が現れた。

半径が 2.2mm の円周位置の θ は、ピーク値以降では減少していき、再び増加する現象が見られない。この原因が不明であるが、円周の周長が大きく、粒子移動の空間が相対的に大きいため、粒子移動への拘束が相対的に小さいためであろうと推測している。

中空心棒の下端面上方の試料 (厚さ : 5mm) のせん断変位は測定できない。Fig. 3 (c) に示すように中空心棒の下端面から上銅棒の下端面まで直線的に変化すると考えられれば、心棒下端面上方 1mm の高さにおける試料の

Fig. 5 One of images of vertical circumferential section of mortar N. (rotating angle : 63 deg., radius of circumference : 1.3mm)

Fig. 6 Relationship between θ and S_d at the circle positions with different radii. (Position of shear plane: the lower end of CHR)

S_d は、心棒下端面位置の 80% になる。したがって、心棒下端面上方 1mm の高さにおける各円周位置の S_d をこの割合で求めた。 S_d と θ の関係を Fig. 7 に示す。

半径が 1.3, 1.4 および 2.2mm の円周位置を除き、平均粒子接点角は、せん断変位の増加に伴って大きくなるが、ある値に達すると逆に減少することが認められた。Fig. 6 に示すような、減少後に再び増加する現象が現れないのは、各円周位置の試料の最大せん断変位が小さいためである。また、半径が 1.3 と 1.4mm の円周位置の θ の減少段階が見られないのは、これらの円周位置は心棒に近く、試料が生じた最大せん断変位は小さく、せん断破壊がまだ発生せず、 θ はそのピーク値に達していないためである。なお、試料の密実程度や粒子分布の影響で、半径が 2.2mm の円周位置における試料の θ は小さくて、ピーク値になるまで大きなせん断変位が必要であることは、 θ の減少段階が見られない原因と考えられる。

Table 2 に示すように、回転銅棒の回転角は同じであっても、各円周位置の S_d は、円周半径の増加に伴って増大する。回転銅棒の回転角が一定 (27, 45, 63 度) である時の各円周位置における試料の θ と S_d の関係を Fig. 8 に示す。各円周位置の初期平均粒子接点角は異なるが、一定の範囲に分散している。しかし、円周の半径の増大による S_d の増加に伴って、 θ は最初に増加するが、ある値に達すると減少する傾向が見られた。

以上の結果より、フレッシュコンクリートの平均粒子

Fig. 7 Relationship between θ and S_d at the circle positions with different radii. (Position of shear plane: 1mm above the lower end of CHR)

Fig. 8 Variation of θ with S_d at different circle positions under different rotating angles of the revolving rod. (Position of shear plane: the lower end of CHR)

接点角は、せん断変位の増加に伴って増加するが、ピークになると減少することが認められた。村山の粒子集合体理論²⁾によれば、平均粒子接点角の増加・減少段階は、それぞれ粒子材料のせん断破壊前・後の挙動である。また、せん断変形を生じた試料中の任意位置にある粒子の任意断面より得られた粒子接点角についての考察結果は、同じ傾向を示すため、この結果はフレッシュコンクリートの粒子接点の3次元的挙動を反映できるものと考えられる。

3・2 平均粒子接点角の変化に及ぼす垂直圧力の影響

θ - S_d 関係に及ぼす垂直圧力の影響を Fig. 9 に示す。各円周位置におけるせん断前の θ 分布は、垂直圧力によらずほぼ同じである。 S_d の増加に伴う θ の変化傾向は垂直圧力の大小に拘わらないが、垂直圧力は大きいほど、 θ は小さいことが認められた。これは、垂直圧力が大きいほど、内部摩擦抵抗によって支持できるせん断力が増大し、ダイレイタンス抵抗によって支持するせん断力は減少するためである。この結果は、式 (2) の第 1 式で表される傾向と一致している。

3・3 平均粒子接点角の変化に及ぼす試料流動性の影響

Fig. 10 は、流動性が異なる 2 種類の試料 N, H の θ と S_d の関係を示したものである。試料 H でも、 S_d の増加に伴う θ の変化傾向は前述したものと同様である。試料 H の流動性は試料 N より高いが、両者のせん断前後

Fig. 10 Effect of sample's fluidity on θ - S_d relationship.

の θ はほぼ同じ水準である。これは、回転銅棒をアクリル製パイプに挿入した際に、予め装入した試料が強く押し付けられて、高い流動性を有する試料でも圧密されたためである。また、実験時間が長かったため（約 4 時間）、流動性が高い試料でも、水蒸発によって乾燥したことも原因の一つである。

4 結 言

フレッシュコンクリートの粒子接点角およびせん断変位に伴うその変化を解明することを目的として、本研究では放射光 CT イメージングを利用した可視化実験によって、セメントの代替材料であるアルミナ、豊浦砂および水からなるフレッシュモルタルの内部構造を撮影し、粒子の接点角を計測した。また、平均粒子接点角とせん断変位の関係およびそれに及ぼすせん断面上の垂直圧力と試料の流動性の影響を検討した。

実験結果として、フレッシュコンクリートの平均粒子接点角は、せん断変位の増加に伴って最初に増大するが、ピーク値になると、逆に減少する。これらの増加・減少現象は、それぞれせん断破壊前・後の挙動である。リングせん断の場合には、平均粒子接点角の減少段階後に、再び増大する傾向が見られた。また、せん断面上の垂直圧力が大きいほど、平均粒子接点角のせん断変位に伴う増加量は小さい。今回の実験では、試料は圧密や放射光エネルギーによる加熱乾燥の影響を受け、流動性の影響については明らかにすることができなかった。

本研究は、独立行政法人日本学術振興会と（アメリカ）との二国間交流事業（共同研究、研究代表者：李柱国）による支援を得て、大型放射光施設 SPring-8 の産業利用ビームライン BL19B2 で実施した成果の一部である（課題番号：2010A1832, 2011A1754 および 2011B1948）。また、粒子接点角の計測にあたっては、山口大学大学院理工学研究科 博士課程後期大学院生・李慶 濤 氏（現在、中国礦業大学力学与建築工程学院 講師）のご協力を得た。なお、本研究の実施に際して名古屋大学名誉教授・谷川恭雄先生にご助言をいただきました。付記して謝意を表します。

Fig. 9 Effect of vertical pressure on θ - S_d relationship.
(Position of shear plane : the lower end of CHR)

参 考 文 献

- 1) A. Alexandridis and N. J. Gardner, "Mechanical behaviour of fresh concrete", Cement and Concrete Research, Vol.11, pp.323-339 (1981).
- 2) S. Murayama, "Theory of mechanical behavior of soils", pp.65-119 (1990) Gihodo Shuppan Co. Ltd.
- 3) G. H. Tattersall, "The rationale of a two-point workability test", Magazine of Concrete Research, No.25, pp.169-172 (1973).
- 4) S. Yamamoto and H. Matsuoka, "A relationship between fabric changes and shear strain of granular materials under shear", Journal of Geotechnical Engineering, Japan Society of Civil Engineers (JSCE), No.505/III-29, pp.219-228 (1994).
- 5) Z. Li and J. Li, "Experimental investigation on shear deformation of fresh concrete", Journal of Structural and Construction Engineering, Architectural Institute of Japan, Vol.75, No.653, pp.1173-1180 (2010).
- 6) Z. Li, T. Ohkubo and Y. Tanigawa, "Flow performance of high fluidity concrete", Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol.16, No.6, pp.588-596 (2004).
- 7) H. Matsuoka, "A microscopic study on shear mechanism of granular materials", Soils and Foundation, Vol.14, No.1, pp.29-43 (1974).
- 8) S. Murayama and O. Inoue, "Characteristics of particle displacements of sand subjected to shear", Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, No.309, pp.79-89 (1981).
- 9) Z. Li and Y. Tanigawa, "Investigation on granular characteristics of fresh concrete based on visualized experiment Using alternative materials", Journal of Structural and Construction Engineering, Architectural Institute of Japan (AIJ), Vol.77, No.678, pp.1175-1184 (2012).
- 10) K. Konagai, C. Tamura, P. Rangelow and T. Matsushima, "Laser-aided-tomography : a tool for visualization of changes in the fabric of granular assemblage", Journal of Structural Mechanics & Earthquake Engineering, JSCE, Vol.9, No.3, pp.193-201 (1992).
- 11) J. Li and Z. Li, "Effect of boundary restraint on flow of fresh concrete through opening", Journal of Structural and Construction Engineering, AIJ, Vol.76, No.665, pp.1189-1197 (2011).