

# 論文 X線 CT 画像の 3次元粒子計測による砕石の粒子形状の分析

麓 隆行<sup>\*1</sup>・平井 慎一<sup>\*2</sup>・溝口 達也<sup>\*3</sup>・松本 嶺<sup>\*4</sup>

**要旨**：骨材の重要な品質の一つに、粒子形状がある。本研究では、塩ビ管に締め固めた砕石の粒子形状を、X線 CT 画像を用いて、画像解析ソフトで3次元的に計測することを試みた。まず、X線 CT 画像からの粒子分離条件を見だし、粒子計測を行った。その結果から、ふるいを通過するのは、短軸-中軸断面の条件で、目開き以下の短軸と、目開きの 1.4 倍以下の中軸をもつ粒子であること、そしてふるいに留まるのは、中軸-長軸断面の条件で、目開き以上の中軸と、目開きの 1.4 倍以上の長軸をもつ粒子であることがわかった。また、破碎処理が同じであれば、粒径に拘わらず、粒子の形状はほぼ同じとなることなどを明らかにした。

**キーワード**：砕石、粒径、形状、ふるい分け、X線 CT、画像解析、粒子計測

## 1. はじめに

コンクリート用粗骨材として用いられる砕石の品質は、コンクリートの流動性や充填性に関わるとともに、強度を支える役割も担う。さらに、ポーラスコンクリートでは、砕石の間隙がコンクリートの性能に大きく影響する。このように、砕石には、物理的要素、力学的要素、そして化学的要素が数多く求められる。

そのような品質の一つに、砕石の粒子形状がある。砕石の粒子形状を主に反映した試験方法は、JIS A 1104「骨材の単位容積質量及び実積率試験方法」や JIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」の粒径判定実積率である。さらに粒子形状評価として、投影画像を用いた計測などが検討されたが、その検討は2次元でのアプローチであった<sup>1)</sup>。しかし、研究、開発において、粒子形状の違いによる、コンクリートのフレッシュおよび硬化後の性状に及ぼす影響やメカニズムを特定するために、より精度の高い3次元での計測が必要と考えられる。

粒子や空隙を3次元的に観察する方法の一つにX線CT法がある<sup>2)</sup>。X線CT装置は、物質に吸収されたX線量を計測し、逆解析から物質内の密度分布を画像化できる装置である。近年、コンクリート分野でもX線CT装置を用いた研究が進んできている。天明ら<sup>3)</sup>は、X線CT法を用いてコンクリート内部の構成材料の定量化を試みている。また、大友ら<sup>4)</sup>は、コンクリートのひび割れ等の定量化を試みている。研究はさらに発展し、人見ら<sup>5)</sup>はSPring-8を用いたX線CT画像から、また杉山ら<sup>6)</sup>はマイクロフォーカスX線CT装置から、コンクリート中の細孔構造の非破壊分析を行っている。

医学分野では、骨のX線CT画像から、内部の粗密分布を画像解析ソフトで数値化することも行われている。

地盤工学分野でも画像解析ソフトを用いた粒子評価の検討例がある<sup>7)</sup>。しかし、骨材のような大きな粒子に適用した例はほとんど無い。

そこで、本研究では、容器に締め固めた砕石のX線CT画像を画像解析ソフトにより解析し、粒子の特徴を3次元的に把握することを試み、骨材粒子の物理的特性を把握する上での画像解析ソフトの適用性を検討した。

## 2. X線 CT 装置での撮影概要

### 2.1 X線 CT 装置の概要

近畿大学所有のX線CT装置は、浜松ホトニクス社製開放型マイクロフォーカスX線管 L10801(最大電圧230kV, 最大電流 100 μA)と Varian medical systems 製 PaxScan2520V(Active pixels1408×1888pixel)の受感パネルを有している。X線の放射量や強度は、電圧と電流により調整する。本装置はX線管と受感パネル、そしてサンプルとの位置関係は固定されており、その最小 voxel サイズは0.0613mmとなる。X線は放射状に照射されることから、1度に直径100×60mm程度の範囲が撮影可能である。図-1に示すように、X線管から照射されたX線は、放射状に照射され、サンプルを透過し、受感パネ

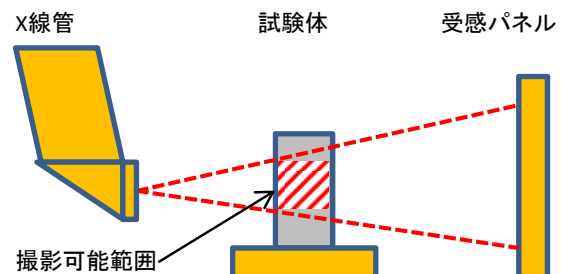


図-1 X線 CT 装置の概要

\*1 近畿大学 理工学部社会環境工学科 講師 (正会員)

\*2 近畿大学 理工学部社会環境工学科 (非会員)

\*3 近畿大学 大学院総合理工学研究科環境系工学専攻 (学生会員)

\*4 近畿大学 大学院総合理工学研究科環境系工学専攻 (非会員)

ルに到達し、透過画像が撮影される。この透過画像を、サンプルを中心に回転しながら必要数(プロジェクション数)を撮影する。それらの透過画像を再構成ソフトで逆解析し、X線吸収分布を白黒で16bitの輝度を持つ3次元のX線CT画像として保存する。

## 2.2 試験体の作製

赤穂産流紋岩砕石 2.5~25mm を絶乾状態にした後、呼び寸法 2.5, 5, 10, 15 および 20mm のふるい(目開き 2.36, 4.75, 9.5, 16 および 19mm)で、2.5-5mm, 5-10mm, 10-15mm および 15-20mm の範囲に分級した。その後、図-2のように内径 83×高さ 150mm の塩ビ管に3層で、ジッキングにより各層 50 回締め固めた。X線CT装置での撮影は、高さ 75mm の位置が中心となるように調整した。

## 2.3 骨材粒子に関する物性試験

画像解析の測定内容を確認するため、以下の物性を物理的試験から求めた。まず、容器内に占める砕石の体積率を間隙への注水量から求めた。また、締め固めに用いた骨材のうち、粒径範囲ごとに粒子 20 粒の寸法をノギスで測定した。目視で最も長いと判断した軸を長軸として計測した。そして、その直角方向を計測し、短い方を短軸、残りを中軸とした。各軸の 20 個の平均を測定値とした。

## 2.4 X線CT装置の撮影概要

X線CT法では、適切なコントラストを持つ撮影像となるように、X線管の電圧、電流、受感パネルのビニング(いくつかのピクセルをひとまとめに取扱うこと)およびプロジェクション数を調整する。

本研究では、プロジェクション数を 1200 に、また受感パネルを 2 x 2 ビニング(4pixel を 1 つとして撮影。その結果、voxel サイズは 0.1226mm となる)に統一した。



図-2 締め固めた砕石の様子

また、X線管の電圧、電流の条件を判断するために、試験体の透過画像でのX線の透過状況および撮影後のX線CT画像の鮮明状況を確認した。例えば、照射したX線はバラツキを持つ。そのため、そのうち低エネルギーの方が物質により多く吸収され、結果的にエネルギーピークが高い側に移動するビームハードニング現象を防ぐ必要がある。また、最適なコントラストを得るために、最もX線が透過しにくい箇所、X線の透過量が最小限となるように調整した。これらの対応が不十分であれば、ノイズとなる線やモヤがかかるような不明瞭な箇所が現れる。複数検討の結果、各粒径範囲での撮影条件を表-1のように決定した。撮影画像の例を図-3に示す。

## 3. 画像解析概要

### 3.1 画像解析の流れ

画像解析の流れを図-4に示す。再構成により得られたX線CT画像を読み込み、計測したい範囲(緑色)を決定する。次に、輝度分布とX線CT画像を確認し、ノイズ除去などの画像処理を行いながら、砕石と間隙を分ける2値化処理を行う。そして、2値化処理画像の砕石を粒子ごとに分離、認識する粒子分離処理を行う。図-5に3次元粒子分離画像を示す。その後、各粒子の形状や方向に関する物性を計測する粒子計測を行う。本研究では、市販の産業用画像解析ソフト、ラトックシステム

表-1 X線CT装置での撮影条件

粒径範囲(mm)	2.5-5	5-10	10-15	15-20
X線管電圧(kV)	135	135	135	140
X線管電流( $\mu$ A)	80	80	80	80

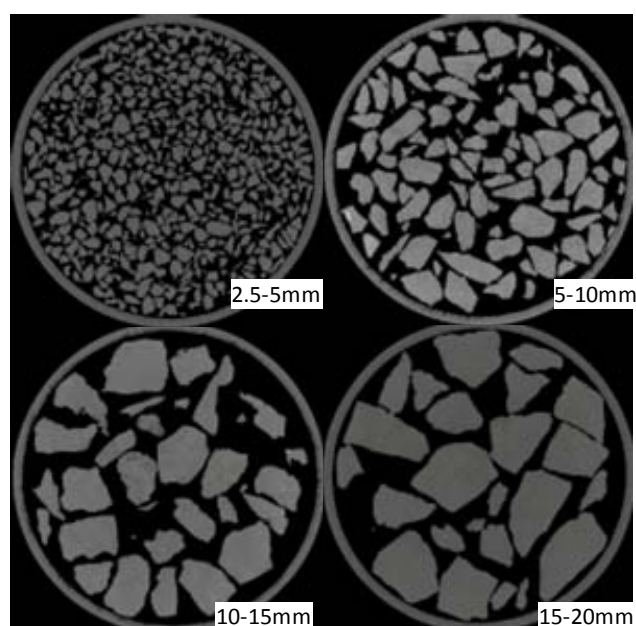


図-3 各粒径範囲のX線CT画像例(XY断面)

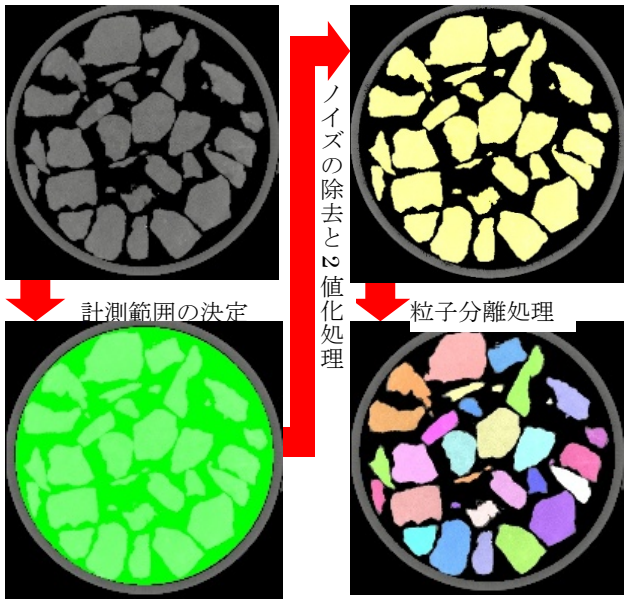


図-4 画像解析手順のフロー図

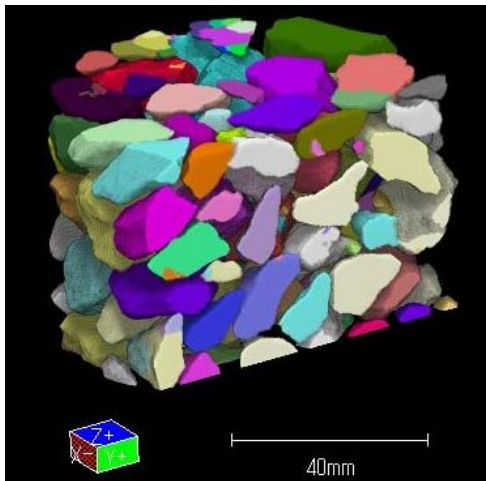


図-5 粒径 10-15mm の碎石の 3次元粒子分離画像

エンジニアリング社製 TRI - 3D - BON - PRTを使用した。

### 3.2.2 値化処理と粒子分離処理の概要

まず、分析ツールとして使用するため、処理時間が最低限となるように、X線CT画像の解像度や計測範囲(高さ)を調整した。voxel サイズを、2.5-5 mm の場合に 0.1226mm, 5-10mm の場合に 0.1773mm, 10-15mm と 15-20 mm の場合に 0.2452mm とした。また、計測高さを 2.5-5 mm の場合に 20mm, 5-10mm の場合に 40mm, 10-15 mm の場合に 50mm, 15-20mm の場合に 60mm とした。

X線CT画像では、岩質や形状が不均一なので、骨材と間隙の境界が明確でなく、グラデーションを有することから、図-6での最小頻度の輝度値とX線CT画像から粒子と判断される輝度値が異なる。そこで、まず2値化処理では、小さなドットとして現れるノイズの除去処理を行った後、画像ごとの輝度分布から碎石と間隙の閾値の目安をつけた。その後、2値化により計測される容

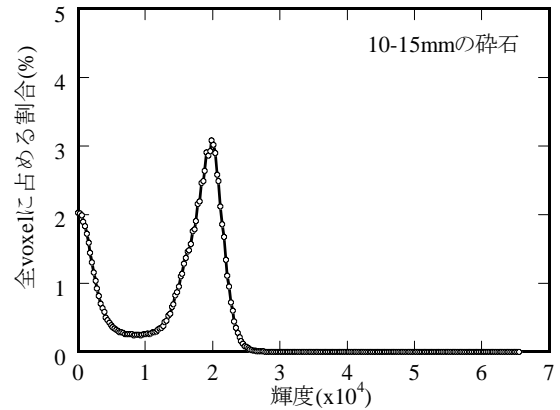
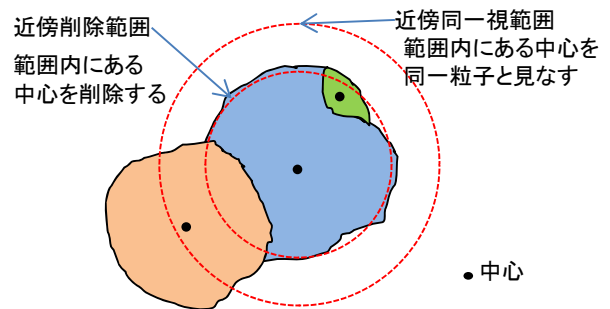


図-6 輝度分布例



この状態であれば、3つの粒子は同一粒子と判断され、一つの粒子として色づけされる

図-7 粒子近傍条件の概念図

表-2 碎石での粒子分離処理での各条件

分離条件名	E4	E3
分離対象	碎石	碎石
エロージョン(回)	4	3
近傍削除(粒径×倍)	1	1
近傍同一視(粒径×倍)	1.4	1.4
ダイレーション(回)	4	3
微小粒子統合直径(最小ふるい目×)	0.4	0.4

器に占める碎石の体積率が、注水法から算出される碎石の体積率とほぼ等しくなるように閾値を調整し、最終的な2値化の輝度値を決定した。

粒子分離処理は、複雑な粒子形状をとらえる条件を決定するため、次のような点を考慮して行った。

2 値化処理した画像に対して、粒子分離処理を行っても、近傍の碎石同士は点や面で接触しているため、隣り合う2つの粒子が1つの粒子と判断(同一視)される。また、1つの粒子でも、くびれが大きいと2つの粒子として分離される。それらの判断誤差を減らすため、既往の研究<sup>7)</sup>を参考に、エロージョン処理を数回行った後に、近傍処理条件を付けて粒子分離処理を行い、その後、ダイレーション処理によって、もとの状態を近似した。

エロージョン処理とは、各画素と隣り合う画素を調べ、

そのどれか一つでも間隙の一部であれば、その画素を間隙に置き換える操作を繰り返し、粒子表面を浸食する処理である。本研究では、隣り合う4つの画素を対象とした。ダイレーション処理はその逆である。これにより、複数の粒子が1つの粒子と誤認されることを防ぐ。既往の研究<sup>7)</sup>でも、エロージョンとダイレーションの繰り返しには、適正な回数があることが指摘されている。

上記の分離処理を優先すると1つの粒子の複数分割が起こる。それを防ぐために近傍削除、近傍同一視および微小粒子統合直径を、分離画像を確認しながら条件を設定した。図-7のように「近傍削除」とは中心点に近い粒子を削除する条件、「近傍同一視」とはその粒径から判断して隣り合う距離が近い粒子を同一視する条件、および「微小粒子統合直径」とは1voxelでも接触している粒子同士で同一視する微小粒子の最大寸法の条件である。

以上の条件に関して、本研究では、粒子分離状態を画像で確認しながら検討した結果、表-2に示す分離条件E4を試みることにした。その後、比較検討のために、2.5-5mm、5-10mmの粒径範囲について、分離条件E3も試みた。

なお、粒子分離後、各粒子を断面2次モーメントが同じとなる楕円体に近似した後、最も長い長軸と、それに直行する中軸および短軸を求め、長軸と短軸の比（アスペクト比）を求めた。さらに楕円体と同体積の球の直径を球相当径として算出した。

#### 4. 砕石粒子の画像解析結果と考察

##### 4.1 画像解析条件とその影響について

図-8に異なる算出法で求めた容器に占める砕石の体積率を示す。2値化時の体積率は、注水法で計測した体積率と同程度となるように調整していた。しかし、粒子分離処理を行うと、粒径範囲が小さいほど体積率の減少が大きくなった。エロージョン処理を4回とした分離条件E4に比べて、3回とした分離条件E3とした場合、体積率が1~3%大きくなった。図-9のように、粒子分離

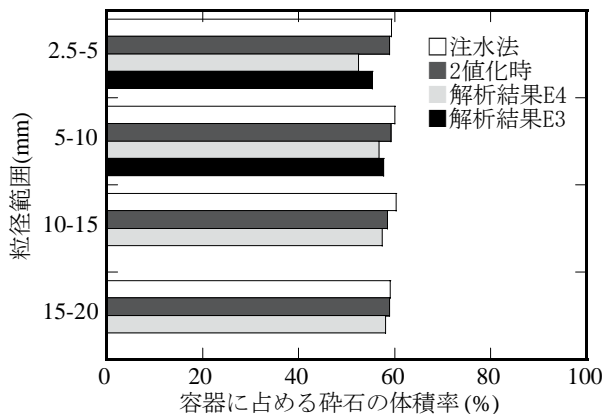
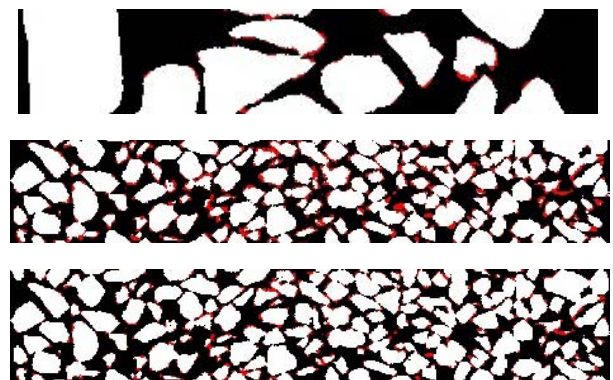


図-8 容器に占める砕石の体積率の違い

処理によって削除された部分を赤色で示すと、粒径が小さいほど、またエロージョン回数が多いほど、粒子の周囲に赤色が多いことがわかる。これは、粒径に対する解像度の影響により、エロージョンによる浸食が大きくなったと考えられる。そこで、voxelサイズとふるいの最小目開きとの比と砕石の体積率減少量との関係を図-10に示す。両者は強い相関をもち、曲線関係となった。ふるいの最小目開きに対するvoxelサイズを0.03以下とすると体積減少率は1%程度にとどまる。もし、0.03以上となっても、エロージョン回数を1回減らすことで体積率の減少を4割ほど抑制できることがわかった。

次に、長軸長さに関する画像解析の結果と実測値との関係を図-11に示す。実測値は、ノギスの当て方が安定しないためにばらつき、分離条件E4に比べて±1割程度の差が生じたと考えられる。分離条件E4を用いた場合と分離条件E3を用いた場合の差は1mm以下となり、エロージョンによる砕石の体積率の減少に比べて差が小さかった。

以上の実測値との差や分離条件の影響から、粒径範囲2.5-5mmおよび5-10mmの場合の分離条件をE3に、また10-15mmおよび15-20mmの場合の分離条件をE4として、



(上 15-20mm E4, 中 2.5-5mm E4, 下 2.5-5mm E3)

赤色がエロージョンにより分離処理後、消えた部分

図-9 エロージョンによる粒子の変化

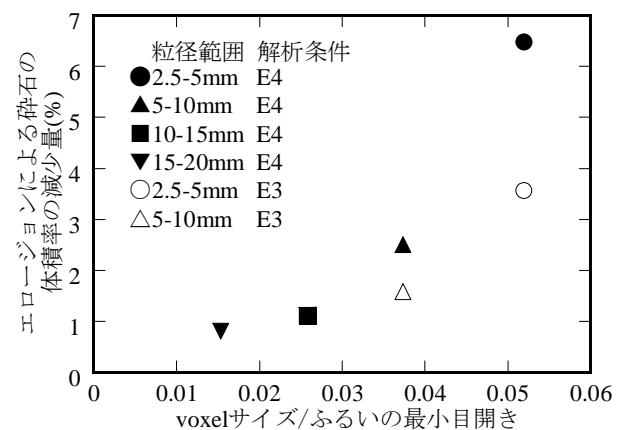


図-10 voxelサイズとふるいの最小目開きとの比と砕石の体積率減少量との関係

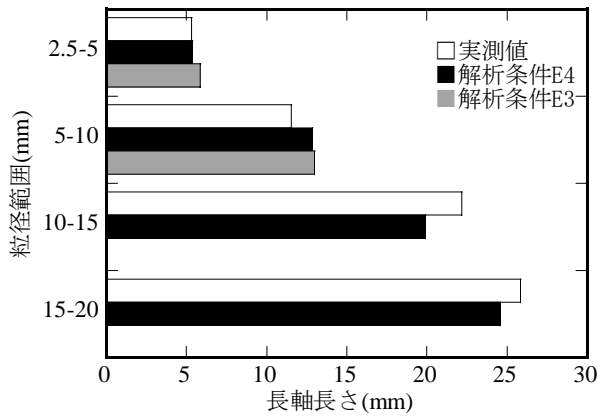


図-11 長軸長さに関する解析結果と実測値との関係

以下の粒子特性の考察を行った。

#### 4.2 使用した砕石粒子の物理的特徴について

計測した長軸、短軸、中軸および球相当径の体積分布を示し、骨材のふるい分けと粒子形状との関係を調べた。その結果を、図-12～15に示す。図中に縦方向の実線は使用したふるいの目開きを、点線はその1.4倍を示している。目開きは正方形の1辺であり、対角線はその約1.4倍となるからである。なお、個数割合ではなく、体積割合としたのは、単位容積内に占める粒子の割合を表すことを考えたからである。

2.5-5mmの粒径範囲では、長軸の長さは小さい目開きの1.4倍以上で多くなり、そのピークは約5mm程度となり、10mm以上の粒子も存在した。短軸の長さはほとんど大きい目開き以下で、ピークは約2.5mmであった。短軸に比べて、長軸がなだらかな曲線となったのは、0.5mmごとの分布としたため、2.5mmに対する分解能と、5mmに対する分解能の違いによる差であると考えている。中軸の長さはおよそ小さい目開き以上で、大きい目開きの1.4倍以下の範囲に留まっていた。また、中軸と球相当径は、ほぼ同じ曲線となり、ふるい分けられた粒子の中軸は、2.5-5mmの球形に相当する長さではあるが、長軸や短軸が中軸とは大きく異なることもわかる。

粒径範囲が大きくなった場合、4.1節で示したように、粒子分離処理の精度が良いため、各軸の明確なピークが見られなくなるものの、長軸、中軸、短軸および球相当径の関係は、粒径範囲2.5-5mmと同様の傾向が見られた。

以上から、ふるいを通過するのは、短軸-中軸断面の条件で、目開き以下の短軸と、目開きの1.4倍以下の中軸をもつ粒子であると考えられる。一方、ふるいに留まるのは、中軸-長軸断面の条件で、目開き以上の中軸と、目開きの1.4倍以上の長軸をもつ粒子であると考えられる。

次に、長軸と短軸の比（アスペクト比）の分布を図-16に示す。アスペクト比の分布は、粒径範囲に拘わらず、2.0をピークとして、ほぼ同じ曲線を描いていた。このこ

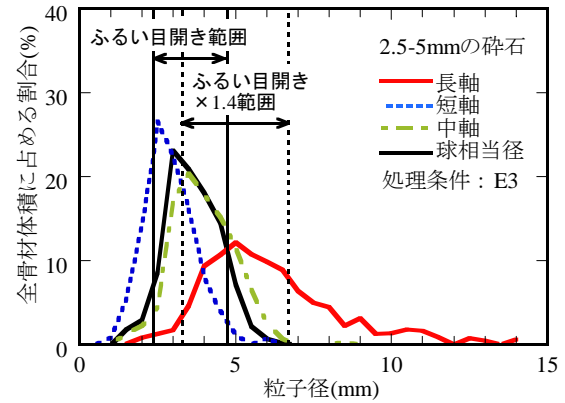


図-12 粒径2.5-5mmの砕石に占める粒径分布

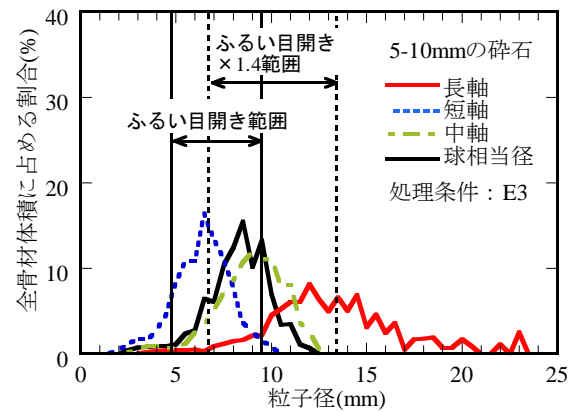


図-13 粒径5-10mmの砕石に占める粒径分布

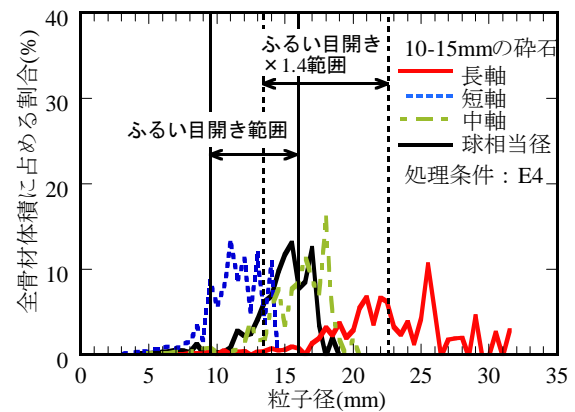


図-14 粒径10-15mmの砕石に占める粒径分布

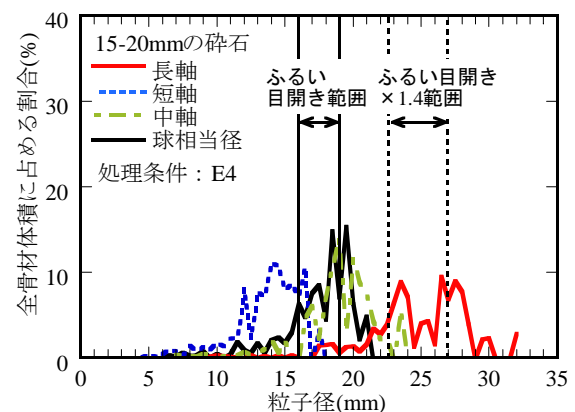


図-15 粒径15-20mmの砕石に占める粒径分布

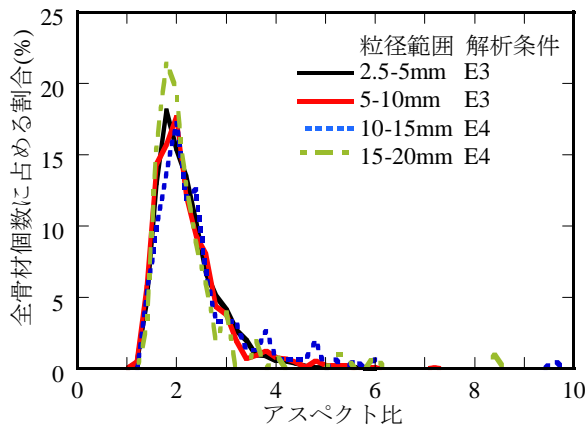


図-16 砕石粒子のアスペクト比の分布

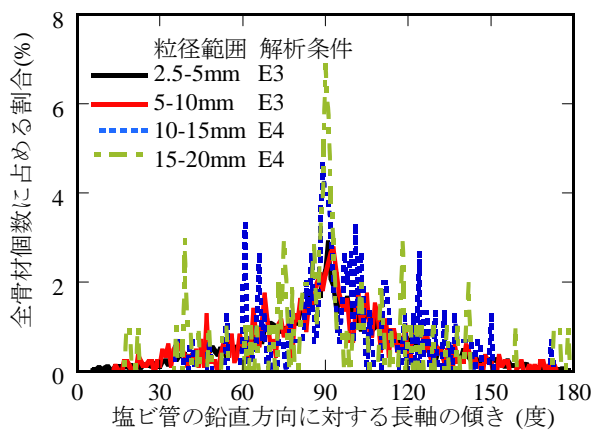


図-17 塩ビ管の鉛直方向に対する長軸の傾きの分布

とから、破碎処理が同じであれば、粒径に拘わらず、粒子の形状はほぼ同じとなることがわかる。

図-17 に塩ビ管の鉛直方向に対する長軸の傾きの分布を示す。90度、すなわち長軸が水平状態の粒子が多いことがわかるが、±30度の角度の粒子も多いことがわかる。その傾向は、粒径が5mm以上となると強くなった。これは、締め固め方による影響もあるが、粒径が大きいと、直径83mmの塩ビ管の側面に粒子があたり、水平状態にならない粒子の割合が多くなるためと考えられる。その数値化も可能であることがわかる。

## 5. まとめ

本研究で得られた、X線CT画像解析に関する条件と、砕石の粒子特性に関する考察から以下の知見が得られた。

- 1) 内径83mmの塩ビ管に締め固めた砕石のX線CT画像を得るための最適な条件は、X線管の電圧が135～140kV、電流が80 $\mu$ Aであった。
- 2) 砕石粒子の画像解析では、輝度分布から砕石と間隙の閾値の目安をつけ、X線CT画像を見ながら閾値を決めて2値化し、エロージョン4回、近傍削除半径 $\times$ 1、

近傍同一視半径 $\times$ 1.5、ダイレクション4回、微小粒子統合直径最小ふるい目寸法 $\times$ 0.4として粒子分離処理を行うのが有効である。

- 3) エロージョンによる体積率の減少は、ふるいの最小目開きに対するvoxelサイズの比と強い曲線関係があり、その比を0.03以下とすると1%程度の体積率の減少にとどめることができる。それ以上であった場合もエロージョン回数を1回減らすことで4割ほど体積率の減少をおさえることができる。
- 4) ふるいを通過するのは、短軸-中軸断面の条件で、目開き以下の短軸と、目開きの1.4倍以下の中軸をもつ粒子である。一方、ふるいに留まるのは、中軸-長軸断面の条件で、目開き以上の中軸と、目開きの1.4倍以上の長軸をもつ粒子である。
- 5) 破碎処理が同じであれば、粒径に拘わらず、粒子の形状はほぼ同じとなる。
- 6) 締め固めにより砕石の長軸は水平に近くなるが、容器の直径に比べて粒径が大きいと、塩ビ管の側面に粒子があたり、水平状態にならない粒子の割合が多くなる。

以上より、骨材の粒子特性をX線CT画像による3次元粒子計測により把握することが可能であることがわかった。

## 参考文献

- 1) 笠井芳夫他：コンクリートの試験方法上，技術書院，pp. 32-37，1993.
- 2) 麓隆行：セメント系材料への気体吸脱着等温線の利用に関する研究の動向，コンクリート工学，Vol. 49，No. 11，pp. 47-52，2011.
- 3) 天明敏行他：X線CT法を用いたコンクリートの材料構成定量法の提案，日本コンクリート工学年次論文集，Vol. 30，No. 2，pp. 739-744，2008.
- 4) 大友鉄平他：補強ポーラスコンクリートの内部ひび割れ性状に関する研究，セメント・コンクリート論文集，Vol. 62，pp. 225-231，2008.
- 5) 人見尚他：SPring-8におけるX線CT像によるモルタル微細構造の観察，コンクリート工学年次論文集，Vol. 26，pp. 645-650，2004.
- 6) 杉山隆文：高解像度型X線CTによるAEモルタル中の空隙構造の透視，土木学会論文集E2，Vol. 67，No. 3，pp. 315-360，2011.
- 7) 松島亘志他：SPring-8 マイクロX線CTによる粒状体の3次元微視構造の定量化，応用力学論文集，Vol. 11，pp. 507-515，2008.