

# X線CT法を用いた コンクリート円柱供試体の内部構成情報の抽出

若木 伸也<sup>1</sup>・高橋 良和<sup>2</sup>・澤田 純男<sup>3</sup>

<sup>1</sup>京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻  
(〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

E-mail:wakaki@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>京都大学防災研究所准教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: yos@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>京都大学防災研究所教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: sawada@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

本研究では、コンクリート円柱供試体のX線CT画像から、内部構成情報として骨材の位置・寸法に関する情報を画像処理により抽出する方法について検討する。まずはコンクリート円柱供試体のX線CT画像を撮影する。その後、骨材を画像から抽出するには閾値処理を用いるが、供試体内部でのX線吸収により供試体中心付近の骨材がうまく抽出されないため、供試体表面からの距離に応じてCT値を補正し、ノイズを除去するために、改良メジアンフィルタによる処理を施した。内部構成情報抽出の妥当性を評価するため、画像から抽出された骨材の粒度曲線を推定し、実際のふるい分け試験結果との比較を行った。粒度曲線は断面によりばらつきがあるが、平均線の形状は実際のふるい分け試験結果と合致した。ただし、ふるい分け試験結果よりも全体的に粒度を小さく見積もっており、ノイズ除去の改善や画像の3次元データの利用を進める必要がある。

**Key Words :** X-ray CT, Image processing, Concrete, Constitutive information

## 1. はじめに

地震によるコンクリート構造物の被害を軽減するためには、コンクリートの破壊メカニズムを理解することが重要である。コンクリート構造を解析するに当たっては、本来骨材やセメントペーストなどの複合材料であるコンクリートを一様な材料として取り扱うマクロモデルが主流であるが、破壊性状を精度よく評価するためには、それぞれを別にモデル化するミクロモデルが有用である。ミクロモデルはマクロモデルに比べて仮定が少なく済むために、簡易な構成則の適用も可能となる。一方、コンクリートのミクロ解析モデルの構築には、骨材の位置・形状・寸法といった情報が必要であるが、これらの情報はX線CTを用いることにより非破壊で得ることが可能である。既往の研究として、天明ら<sup>1)</sup>によるヒストグラムを用いて空隙・骨材・モルタルを分離し、断面に占める割合を検討されている。本研究では、さらにX線CT画像から画像処理によりコンクリート円柱供試体の内部構成情報として骨材の位置・寸法を抽出することを試みた。これらの情報をもとに粒度曲線が推定でき、ふるい分け試験から得られた粒

度曲線との比較を行い妥当性について検討した。

## 2. コンクリート円柱供試体のX線CT画像取得

### (1) X線CT装置

本研究で用いたX線CT装置は、 $\mu$ フォーカスX線CT装置TOSCANNER-32250  $\mu$  hdkである。装置の仕組みを図-1に示す。

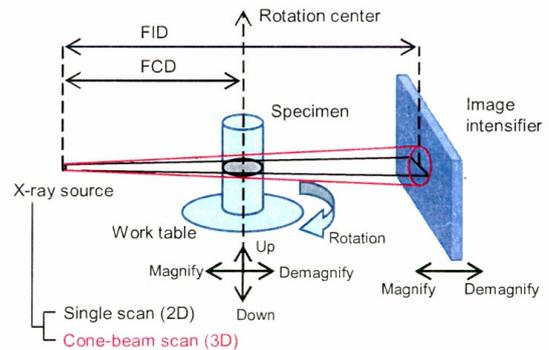


図-1 X線CT装置の仕組み

装置では、X線発生装置から試料を通過して検出器に到達したX線の強度をもとに、円柱供試体内部のX線吸収強度分布をCT値として計測し、CT画像化することができる。X線吸収強度は密度と線形の関係にあるので、これを利用して供試体内部局所の密度が分かる。骨材とペーストは密度が異なるので、CT画像を用いてCT値をもとに骨材を抽出することができる。

### (2) コンクリート円柱供試体

供試体はX線CT装置での撮影を考慮して直径57mm、高さ114mmの円柱型で製作した。供試体製作に用いたコンクリートの配合を表-1に示す。

表-1 コンクリートの配合

単位量 (kg/m <sup>3</sup> , 減水剤のみcc/m <sup>3</sup> )				
水	セメント	細骨材	粗骨材	減水剤
145	290	867	952	725

スランプ試験は2回行い、結果は17.1cm、15.8cmであった。また、圧力法により計測した空気量は2.6%であった。

### (3) コンクリート円柱供試体のX線CT画像

供試体の撮影により991×1001×352ボクセルの画像が得られた。1ボクセルの寸法は60.83 μm×60.83 μm×400 μmである。図-2はCT画像の下から60mmの位置におけるスライス（水平断面図）である。黒い部分ほどCT値が高く、すなわち密度も高い。

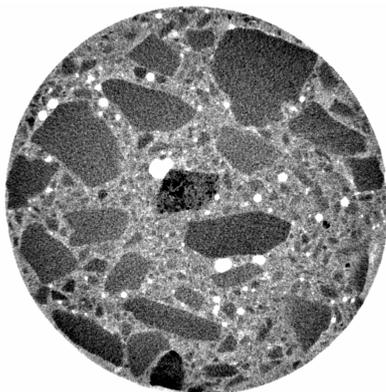


図-2 供試体のCT画像（下から60mmの位置）

## 3. X線CT画像からの画像処理による骨材抽出

### (1) 骨材の抽出方法

骨材はモルタルとは密度が異なるため、CT値も異なる。これを利用して、CT画像からの骨材の抽出は、CT値がある値（閾値）以上であれば骨材としてみなす閾値処理により行う。図-3にCT画像のCT値ヒストグラムを示す。

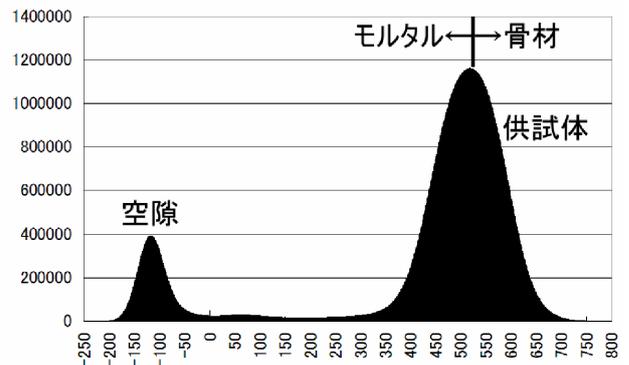


図-3 CT画像のCT値ヒストグラム

突出して高くなっている部分（モード）が2箇所あり、左側が空隙および供試体周囲の空間のモード、右側が供試体のモードと考えられる。供試体のモードはモルタルと骨材で構成されるとすると、CT値の高い部分は骨材であると考えられるが、モルタルと骨材の境界は明確ではない。CT値562を閾値と採用し、図-2に閾値処理を適用した結果図-4である。

図-4に示すうち、黒い部分が骨材である。供試体外縁部の骨材は抽出できたが、供試体中心部の骨材は抽出できていない。

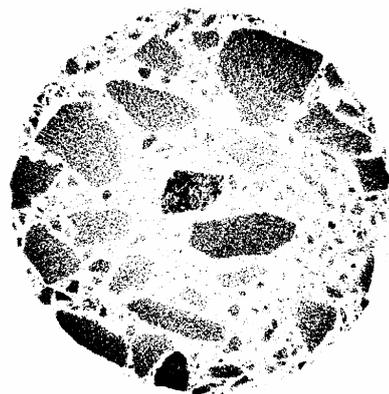


図-4 閾値処理の結果（下から60mm）

### (2) 供試体内部の補正処理

図-4において供試体中心部の骨材が認識できなかったのは、X線が供試体内部に浸透する過程で吸収され、強度が減衰したためと考えた。そのイメージが図-5である。供試体中心部のCT値が小さくなるため、供試体中心付近の骨材は不鮮明となる。

そこで、供試体の表面からの距離に応じてCT値を補正する（供試体内部の補正処理）。

X線強度変化量はX線吸収量に等しく、円柱供試体内部密度は均一であるという仮定をおくと、 $f(s)$ をX線強度、 $s$ をX線浸透深度、 $k$ をX線吸収係数として、ある浸透深度におけるX線強度変化量 $df$ は、

$$df = -kf \quad (1)$$

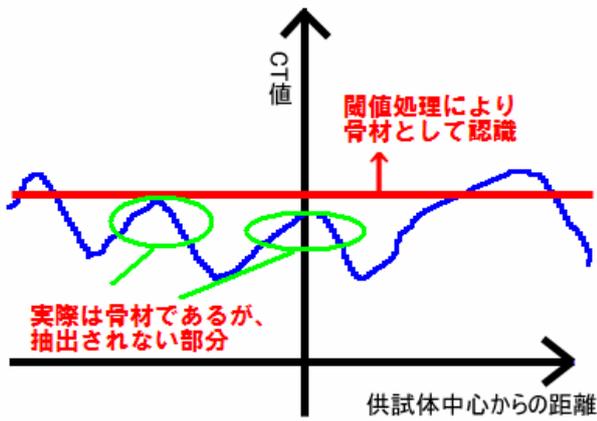


図-5 補正処理前の CT 値断面の様子

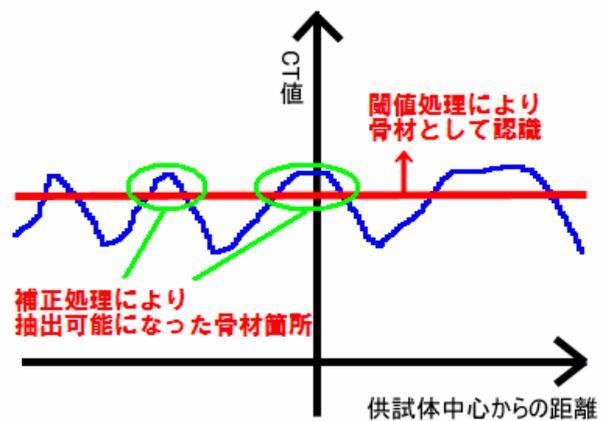


図-6 補正処理後の CT 値断面の様子

となる。これを積分して、積分定数を  $T$  とおくと、

$$f(s) = Te^{-ks} \quad (2)$$

となり、 $T = 1$  (単位強度) としたときの逆数より、

$$F = e^{ks} \quad (3)$$

が補正係数となる。

図-6に補正処理後の、画像断面のCT値と閾値との関係の様子を示す。供試体中心付近の骨材も閾値よりも大きくなるため、閾値処理により抽出されることが期待できる。

今回撮影したCT画像では、 $k=0.0004$ として補正処理を行った。その結果を図-7に示す。供試体中心部の骨材もよく認識されていることが分かる。しかし、骨材間に黒い斑点が見られる。これらは、本来骨材と認識されないべきであるが、骨材と認識された点である。CT画像内のノイズの影響と考えられ、骨材の粒子を識別する際に支障をきたす恐れがあるため除去する必要がある。

### (3) 改良メジアンフィルタによるノイズ除去

図-7で現れたノイズは、局所的に現れる極端なCT値であると考えた。そこで、メジアンフィルタによるノイズ除去を試みた。

メジアンフィルタとは近傍点の中央値を出力するフィルタである。最大値・最小値に関わらず中央値を出力するので、極端な値を除去する性能に優れているという特徴がある。ただし、画像全体に適用すると細かいエッジがぼやけるという欠点もある。

これを回避するため、本研究ではノイズ検出関数によりノイズを抽出し、その部分のみを補正する改良メジアンフィルタを適用した。ノイズ検出関数として、対象点のCT値が、フィルタ窓内のCT値の中央値からフィルタ窓内のCT値の標準偏差より大きく乖離していればノイズと認識するものを適用した。

改良メジアンフィルタ処理後に閾値処理を適用した画像を図-8に示す。改良メジアンフィルタにより、

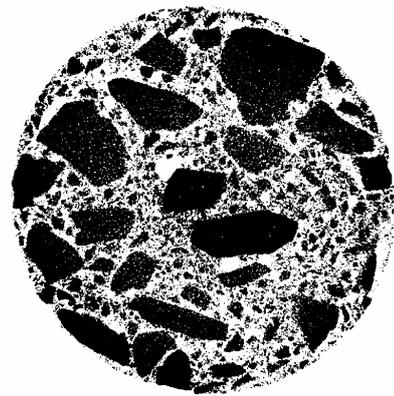


図-7 補正処理の結果

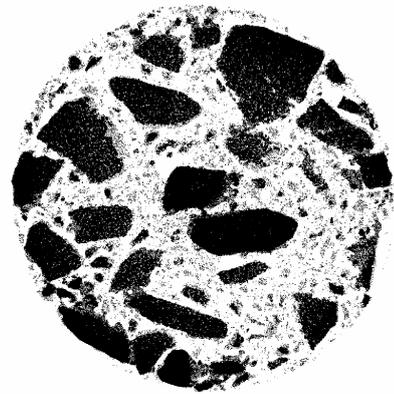


図-8 改良メジアンフィルタの結果

ノイズが除去され骨材の形状がより鮮明になった。

### (4) 骨材検出性能の検証

供試体内部の補正処理および改良メジアンフィルタによるノイズ除去を行ったCT画像から、20枚ごとに1枚、計13枚のスライスを選出し、閾値処理により骨材を抽出した。

その後抽出した骨材の粒度曲線を推定し、ふるい分け試験の結果と比較した。骨材の形状を楕円と仮定し、画像処理により面積と楕円の長径を算出し、ふるい通過寸法として短径を求めた。13枚のスライ

スでの骨材の粒度曲線推定結果および13枚のスライスの平均線を図-9に、平均線とふるい分け試験結果との比較を図-9に示した。なお、ふるいわけ試験結果の粒度曲線には3回施行した平均線を用いた。

断面により粒度曲線はばらつきがあるが、平均線の粒度曲線の形状はほぼ合致している。しかし、画像から推定した粒度曲線はふるい分け試験の結果と比べ、やや左寄りにあるという相違点が見られる。これは、ノイズが除去しきれていないことが原因であると考えられる。

今後、よりよい精度でのノイズ除去や、画像の3次元特性を活かす等により、内部構成情報を抽出する性能の向上を検討していく必要がある。

#### 4. まとめ

コンクリート円柱供試体の内部画像をX線CT装置により撮影し、供試体内部の補正やノイズ除去とい

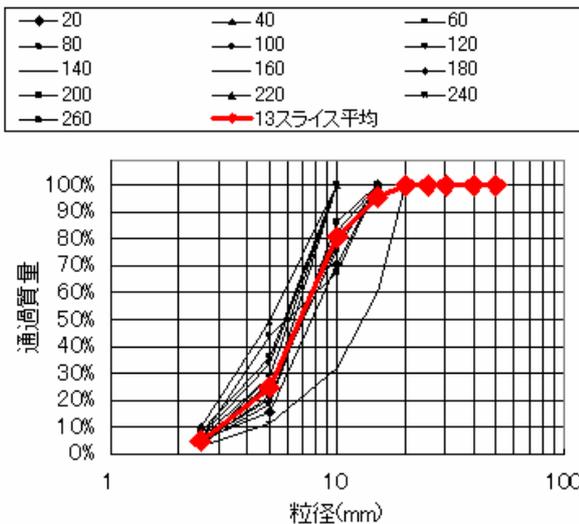


図 10 粒度曲線推定結果

った画像処理により、骨材を目視によらない方法で抽出した。

**謝辞：**本研究は文部科学省科学研究費補助金（若手研究(S)19676004番，代表：高橋良和）の助成を受けて実施したものである。X線CT装置による撮影に際し、京都大学工学研究科社会基盤工学専攻岡二三生教授、肥後陽介助教のご支援、ご助力を得た。ここに厚くお礼申し上げる次第である。

#### 参考文献

- 1) 天明 敏行, 伊藤 剛, 濱崎 大志, 尾原 祐三: X線CT法を用いたコンクリートの材料構成定量化法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, 2008.

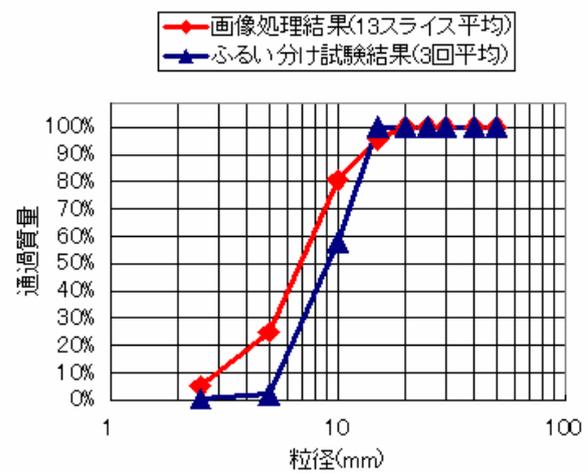


図-11 粒度曲線推定結果とふるい分け試験との比較

## AN ESTIMATION OF AGGREGATE LAYOUT IN A CONCRETE CYLINDRICAL SPECIMEN FROM X-RAY TOMOGRAPHY IMAGES

Shinya WAKAKI, Yoshikazu TAKAHASHI and Sumio SAWADA

In this study, the aggregate's location, size and shape is determined as a constructive information of concrete from X-ray tomography. To extract aggregate data from the image, thresholding approach is generally adopted. However, since the power of X-ray is dropping during the penetration, the CT number should be compensated by a function related to the distance from the edge. For the noise reduction, a modified median filter is applied. In order to investigate the applicability of this process, the size of every aggregates is computed from 13 slice and 2D images. A virtual sieve analysis is conducted. Comparing with the real test, the virtual test tends to estimate the size to be smaller than the real test.