

論文 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

天明 敏行^{*1}・伊藤 剛^{*2}・濱崎 大志^{*3}・尾原 祐三^{*4}

要旨: 非破壊検査技術として用いられる X 線 CT 法は, 物体の内部構造を非破壊で可視化できるだけでなく, X 線 CT スキャナによる撮影画像の数値データである CT 値を用いて画像を定量的に解析することが可能である。本論文は, この特性を利用して, コンクリートの断面画像の CT 値のヒストグラムから骨材, モルタル, 空隙などの各構成材料を区分させるための新しい境界 CT 値 (しきい値) の設定方法を提案するとともに, 本方法をコンクリート供試体に適用し, コンクリート内の空隙面積率, 骨材面積率およびモルタルの相対密度などの分布特性を明らかにする。

キーワード: X 線 CT, CT 値, しきい値, ファントム

1. はじめに

X線CT法はコンクリートの調査診断において有効な方法である。安全管理や法規制, コスト面での制約はあるものの, コンクリート柱などについて, 配筋, 空洞, ひび割れなどの躯体断面位置や立体表示が可能となることから, その有用性が期待されている¹⁾。

一方, コンクリートは水, セメント, 砂, 砂利などで構成される複合材料であるが, コンクリートの物性や力学的な特性, 耐久性などの諸特性は構成材料の特性やその配合比率などに影響されると考えられる。X線CT法では, 断面画像のX線吸収率を表すCT値を分析することにより, 物体を構成する各材料の密度分布の情報が得られるという特徴があり, 筆者らはこのことを利用し, コンクリート中の骨材や空隙, モルタル平均CT値の鉛直分布に関する研究²⁾, 水セメント比の異なるコンクリートの判別法³⁾に関する研究などを行ってきた。

X 線 CT 法によりコンクリートの各材料の構成, すなわち密度や寸法を定量的に検討するには, 撮影された断面画像の画像処理により各材料の境界 CT 値 (しきい値) を適切に設定することが重要である。しかし実際には, X 線 CT 画像に対して, 対象とする物体が「最も見やすくなるように (感覚的に)」しきい値を設定している。この方法は人による判断が行われる医療診断などにおいては最も現実的な方法であるが, 工学的な判断を行うにはより客観的な方法で画像を処理する必要がある。

本論文では, X 線 CT 法を用いてコンクリートの材料構成の定量化を行うため, コンクリートの断面画像の CT 値のヒストグラムを用いて, 比較的大きな骨材, 比較的小さな骨材を含むモルタル, 比較的大きな空隙に分け, それら材料構成の定量化法を提案する。

具体的には, 通常は目視によって設定されるしきい値を客観的に評価する方法として, 空隙とモルタルの境界 CT 値については, CT 値のヒストグラムから特徴点を見出し, 微分処理を行うことでしきい値を決定する。また, 骨材とモルタルの境界 CT 値については, 供試体とともに撮影した標本 (ファントム) を用いてしきい値を決定する。さらに, この方法をコンクリート供試体に適用し, コンクリート内の空隙面積率, 骨材面積率およびモルタルの相対密度分布を定量化する。

2. X 線 CT 法

本研究で使用した装置は東芝製の産業用 X 線 CT スキャナ TOSCANER20000RE である。装置の外観を図-1 に, 遮蔽室内部の様子を図-2 に示す。

X 線 CT スキャナは, 300, 200, 150kV の三通りの選択ができる X 線管と 176 個の検出器が同一水平面に固定されており, これが上下方向に移動する。一方, 供試体



図-1 X 線 CT スキャナ外観

*1 (株)間組 土木事業本部技術部 (正会員)

*2 熊本大学大学院 自然科学研究科

*3 若築建設(株) 九州支店

*4 熊本大学大学院 自然科学研究科教授 工博

はターンテーブルの上に設置され、必要な並進と回転を行う。また、スライス厚 0.3, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0mm の五通りが選択できる。撮影領域は、 $\phi 150\text{mm}$ と $\phi 400\text{mm}$ の二通りが選択でき、フィルタ補正逆投影法により再構成された画像はワークステーションのモニターに表示される。このときの表示画素数は最大 2048×2048 である。本研究では、表-1に示すように、X線管電圧 300kV、X線管電流 2A、スライス厚 2.0mm、撮影領域 $\phi 150\text{mm}$ の条件で撮影を行った。

3. X線 CT 画像と CT 値

$\phi 125\text{mm}$ のコンクリート円柱供試体の X線 CT 画像の一例を図-3 に示す。X線 CT スキャナの解像度は領域の $\phi 150\text{mm}$ に対して 1024×1024 ピクセルであるため、各ピクセルの一边の長さは 0.146mm である。画像上の各ピクセルの CT 値は、X線のスライス厚に相当する厚さ 2.0mm を考慮した体積 $0.146 \times 0.146 \times 2.0\text{mm}$ のボクセルに与えられ、次式で定義される。

$$\text{CT 値} = \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w} K \quad (1)$$

ここで、 μ_t は求める点の X線吸収係数、 μ_w は水の吸収係数で -1 である。 K は任意に設定できる係数であり、本研究では $K=1000$ とした。この場合、空気の X線吸収係数は 0 であるから CT 値は -1000 となる。また、水の CT 値は 0 となる。X線吸収係数は物体の密度にほぼ比例するため、CT 値も密度に比例した値と考えられる。画像では、CT 値が高い（密度が大きい）場合白色に、反対に CT 値が低い（密度が小さい）場合黒色に表示される。

図-3 に示したコンクリート供試体断面画像には 3 つの材料が存在していることがわかる。すなわち、白い部分の骨材、灰色部分のモルタル、黒い部分の空隙である。ここでの骨材とは、実際には粗骨材に加えて細骨材のうち粒径が大きく CT 画像で判別可能な材料である。また、モルタルとは水、セメントに加えて、CT 画像上では骨材と判別できない小さな粒径の細骨材と空気と判別できない小さな空隙を含んだ構成となっている。さらに、空隙とはコンクリート供試体中で画像上判別可能な空隙を示す。本論文ではコンクリートを構成する材料を CT 画像における判断から上記に述べたように 3 つに区分し、それぞれを骨材、モルタル、空隙と呼ぶこととする。

図-4 は図-3 の撮影断面画像の供試体内の CT 値のヒストグラムである。この CT 画像の中から上記の 3 つの材料を抽出して、それぞれの材料の特性を評価するためには、ヒストグラムから 3 つの材料の CT 値の領域を正確に区分することが必要となる。そのためには、しきい

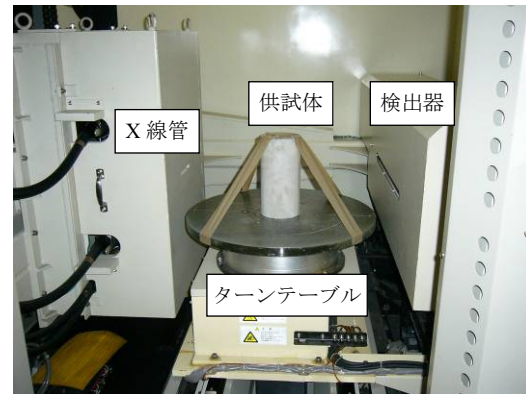


図-2 X線 CT 装置の遮蔽室内の状況

表-1 X線 CT スキャナの仕様

管電圧	300kV
管電流	2mA
スライス厚	2.0mm
撮影領域	$\phi 150\text{mm}$
表示画素数	1024×1024 pixels

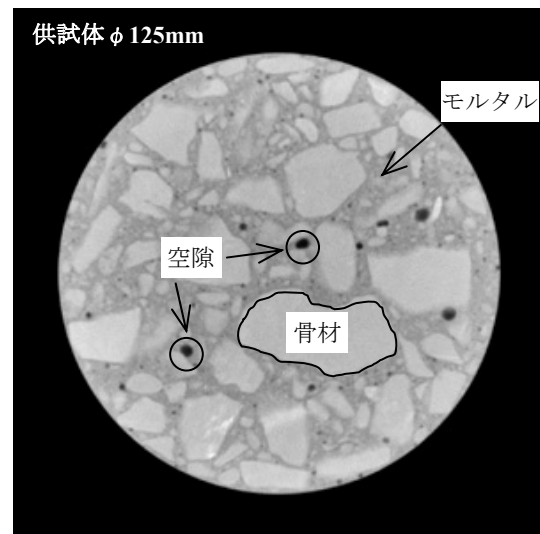


図-3 コンクリートの X線 CT 画像

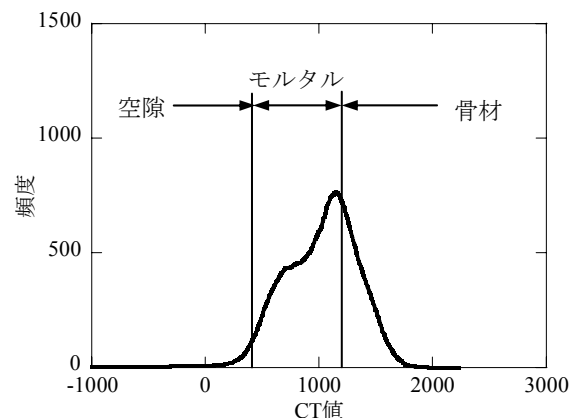


図-4 CT 値の頻度分布 (ヒストグラム)

値として、空隙-モルタルの境界と、骨材-モルタルの境界となる CT 値を求める必要がある。

4. コンクリートの材料構成定量化法

4.1 空隙-モルタル境界 CT 値

(1) 空隙-モルタル境界 CT 値の決定方法

コンクリート供試体中の空隙の量はその割合を考えると微量であり、モルタルに含めることも考えられるが、空隙量のある程度正確に評価することにより、モルタル部の平均 CT 値などの定量評価の精度を高めることが可能となる。

理論上の空気 CT 値は、式(1)において K を 1000 とした本研究の場合には -1000 付近に存在する。しかし、ヒストグラムにおいてこの値付近の CT 値はほとんど存在せず、供試体断面積に 0 以下の CT 値のピクセルが占める割合は約 0.7% である。これは練り混ぜ時のコンクリート供試体中に含まれる空気の全体量の約 4% に対して極端に小さい。この理由は、供試体の領域内に含まれる空気はその面積が小さく、ピクセルの CT 値は体積 $0.146 \times 0.146 \times 2.0\text{mm}$ の空気の一部を含んだ平均値となり、完全な空気として判別することが不可能であるためと考えられる。したがって、理論上の空気量を考慮すると、図-4 に示されるヒストグラムにおいて、供試体内の空隙の CT 値は近隣のモルタルを含むボクセルの影響を受けて 0~500 付近にあると考えられる。

そこで、ヒストグラムの空隙とモルタルの境界付近を拡大したものを図-5(a)に示す。これによると、CT 値が 0 から大きくなっていくとともに頻度が大きくなり、CT 値が 400 付近になると急激に上昇していることがわかる。空隙およびモルタルが単独で存在していると仮定すると、空隙の CT 値ヒストグラムおよびモルタルの CT 値のヒストグラムは図中の細実線で表されると考えられ、実際にはそれらが重なり太実線で表される全体の分布となっていると考えることができる。したがって、この頻度が急激に大きくなる点を空隙-モルタル境界 CT 値(しきい値)と見なすことにした。

これまでのしきい値の決定には画像の大局的な特徴を利用するものが多い。代表的なものには、ヒストグラムが双峰性を示す場合にはヒストグラムの谷を見つけ、それをしきい値とするモード法がある⁴⁾。しかし、ヒストグラムが滑らかな場合や谷が顕著でない場合には、しきい値を決定することは容易ではない。また、人的な要素を持つ決定方法であるため、人によって処理結果が異なる。

そこで、図-5(a)の滑らかなヒストグラムから特徴点を客観的に決定するために、ヒストグラム関数を微分することでしきい値を決定した。すなわち、CT 値のヒス

トグラムを表す関数を $f(CT)$ とし、それを CT について三階微分を行ってしきい値を評価した。二階微分した関数と三階微分した関数を図-5(b)に示す。ここで、 $d^3f/d(CT)^3=0$ となる CT 値を急激に増加する特徴点として空隙-モルタル境界 CT 値とした。図-3 に示す画像例での境界 CT 値は 361 となる。

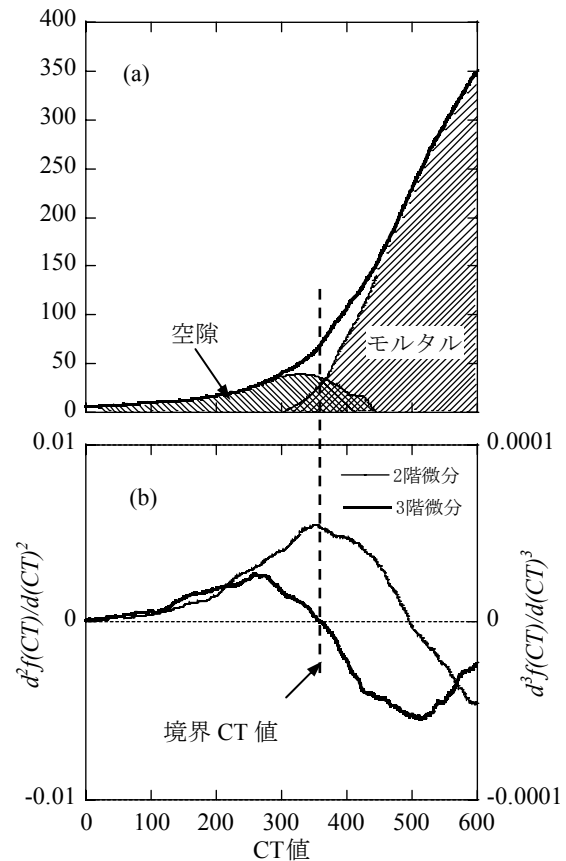


図-5 ヒストグラム関数の三階微分

(2) 空隙面積率の評価

しきい値よりも大きな値の領域を 0、小さい値の領域を 1 とした画像は二値化画像と呼ばれる。図-6 は上述の方法で決定した空隙-モルタル境界 CT 値をしきい値とした二値化画像である。このしきい値よりも CT 値が小さい領域を空隙とし、これを黒色、それ以外を白とし、コンクリート供試体内の空隙の様子を確認することができる。なお、図中の小さな白い円は後述する骨材-モルタル境界 CT 値を求めるためのファントムである。

ここで、黒い部分の面積の総和を供試体の断面積で除した値を空隙面積率と定義すると、この画像では 2.0% となる。空隙面積率は断面画像から算定した 2 次元空隙率で、一般的な空隙率とは異なっているが、空隙の割合を表す 1 つの指標と考えられる。

4.2 骨材-モルタル境界 CT 値

(1)ファントム

コンクリートを構成する材料の内最も密度が高い材料は骨材であり、つぎにモルタルである。これらの CT 値は図-4 のヒストグラムにおいては高い値の領域にプロットされている。しかし、この領域において2種類の材料を区分できるような特徴的な形状は示していない。したがって、空隙-モルタル境界 CT 値を決定するために用いた方法をここで用いることは不可能である。

そこで、P タイル法⁴⁾ と呼ばれる方法を採用した。この方法は、例えば、断面積があらかじめわかっている物体を供試体と同時に撮影し、既知の値を用いてしきい値を決定する方法で、しきい値を客観的かつ安定的に求めることができる。ここでは、ヒストグラムを用いてCT 値の大きい方からピクセル数を累積し、その値が既知の物質の面積に等しくなるときのCT値をしきい値とした。

そこで、P タイル法を用いて骨材-モルタル境界 CT 値を求めるために、図-7 に示すような断面積が既知の標本、すなわち「ファントム」を用い、コンクリート供試体と同時に撮影した。本研究で作製したファントムは、 $\phi 20\text{mm}$ のセメントペーストの中にコンクリートの骨材の密度とほぼ同じである $\phi 10\text{mm}$ の円柱形の花崗岩を挿入したファントムを採用した。

なお、ファントムとは、一般的には CT スキャナの性能などを確認するために使用されており、さまざまな形状や材質のファントムが存在している。医療分野では人体組織を模したファントムを用い、放射線や電磁波による人体への影響の研究、工業分野ではある物体に直径の違う穴を多数空けて、X 線 CT スキャナの空間分解能の評価などを行っている。

コンクリート供試体とファントムを同時に撮影した画像を図-8 に示す。X 線 CT スキャナの撮影領域内に大きな断面のコンクリートと小さな断面のファントムを見ることができる。この画像に P タイル法を適用し、骨材-モルタル境界 CT 値を求めた。

(2) 骨材-モルタル境界 CT 値の決定方法

骨材-モルタル境界 CT 値の評価はつぎのようである。まず、図-9 に示すように、ファントムを円で囲みファントムの領域を画像上で指定する。つぎに、この領域のヒストグラムを図-10 に示すように作成する。ヒストグラムは、コンクリート供試体を CT 撮影した場合と同様に CT 値の高いほうから順に、骨材、セメントペーストの CT 値が分布している。このヒストグラムは骨材（花崗岩）とセメントペーストで双峰性を示しており、ヒストグラムの谷をしきい値として認識することも可能であるが、客観的かつ正確に境界のしきい値を設定するために、ファントムの骨材の面積を用いて P タイル法を適

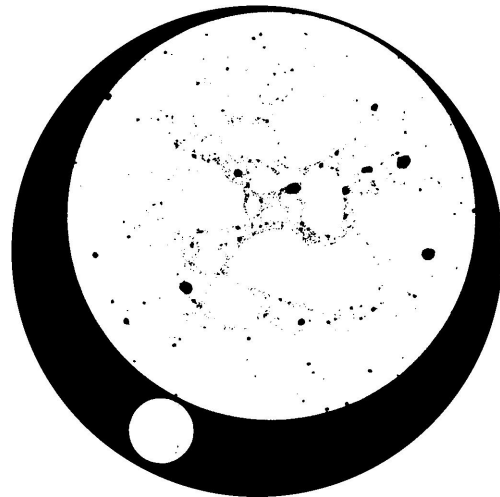


図-6 空気とモルタルの2値化画像

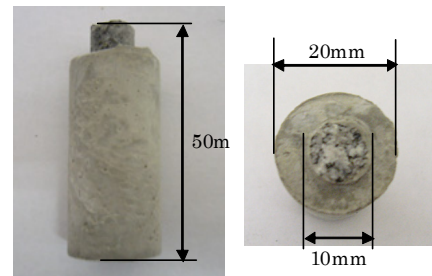


図-7 ファントム

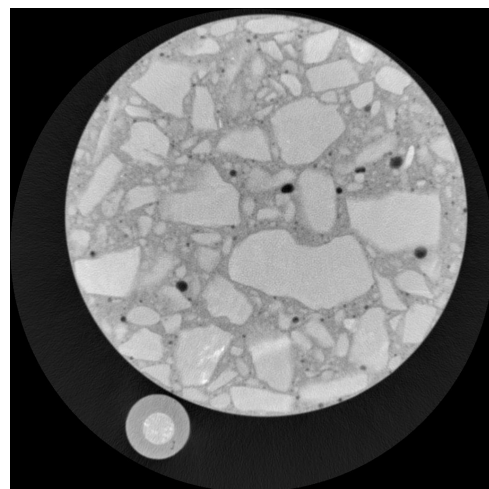


図-8 供試体とファントム

用した。

ファントムの骨材の直径は 10mm であるので、その面積は約 78.5mm^2 である。ピクセルの辺長は 0.146mm であるので、ファントムの骨材の面積をピクセル数に換算すると約 3680 ピクセルとなる。したがって、CT 値の最大値から低い方への累積個数が 3680 ピクセルまでが骨材であると考えられるので、累積個数が 3680 ピクセルになるときの CT 値が骨材-モルタル境界 CT 値であると定義した。図-10 の画像での境界 CT 値は 1092 である。

(3) 面積骨材率

上記の骨材-モルタル境界 CT 値をしきい値として二値化処理を行った画像を図-11 に示す。骨材を黒、それ以外を白として表示しており、コンクリート供試体内の骨材の様子を確認することができる。また、ファントム内セメントペースト表面近くにわずかに黒色の部分が見られるが、円柱の骨材は精度よく二値化されている。

ここで、コンクリート供試体内の黒い部分の面積の総和を供試体の断面積で除した値を骨材面積率と定義すると、この画像では 45.1%となる。骨材面積率は断面画像から算定した 2 次元骨材率で、一般的な骨材率とは異なっているが、骨材の割合を表す 1 つの指標と考えられる。

5. コンクリート供試体への適用

5.1 モルタル供試体の撮影断面における境界 CT 値

制動放射線である X 線 CT をコンクリート供試体などに適用してその定量的な評価を行う場合、留意すべき事項として、厳密に密度を再現できないことがある。例えば、均質供試体を数断面撮影した場合、それらの画像の平均 CT 値がわずかに異なることがある。

この影響を明らかにするために、 $\phi 125\text{mm}$ 、高さ 250mm の室内試験用のモルタル供試体とファントムとを同時に 25mm ごとに撮影した。10 枚の断面画像について、供試体の平均 CT 値と骨材-モルタル境界 CT 値を評価した。この結果を示すと図-12 のようである。

モルタル供試体の平均 CT 値は高さごとにばらついている。これはモルタル供試体が均質ではないことが主な原因と考えられる。一方、骨材-モルタル境界 CT 値も若干ではあるがばらつくことが確認できる。同じファントムであるので、境界 CT 値は同じ値となるはずであるが、この結果は撮影時の周辺環境に CT 値が影響されたために得られたと考えられる。

以上より、コンクリート供試体の各断面の撮影を実施する際には、断面ごとにファントムと同時に撮影することによって定量評価の精度を高めることが可能となる。

5.2 コンクリート供試体の境界 CT 値

$\phi 125\text{mm}$ 、高さ 250mm のコンクリート供試体を作製し、高さ 25mm ごとに 10 断面をファントムとともに撮影した。コンクリートの示方配合は水セメント比 55%、細骨材率 40%であり、粒径 5mm 以上の粗骨材がコンクリート中に占める体積率は 43%であり、5mm 以下の細骨材は 29%である。これらの断面画像に提案した境界 CT 値評価法を適用してそれぞれの面積率を評価した。

撮影位置とそこで評価された空隙面積率および骨材面積率を図-13 に示す。空隙面積率は場所によらずほぼ一定の値を示すが、骨材面積率はばらついている。しか

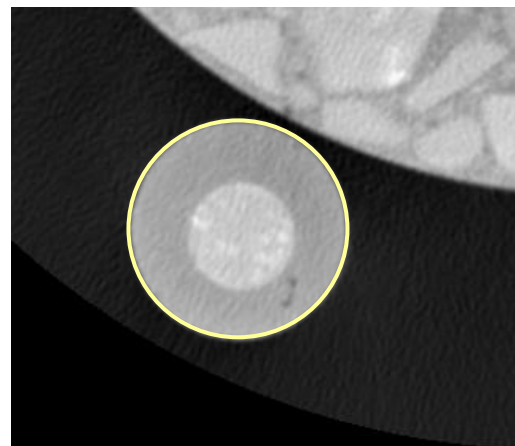


図-9 ファントムの拡大図

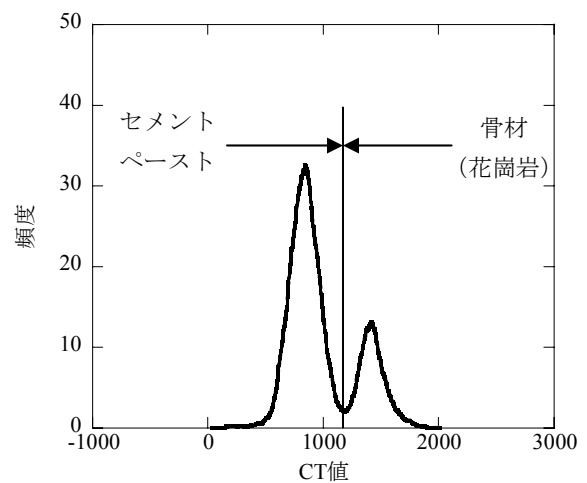


図-10 ファントムの CT 値のヒストグラム

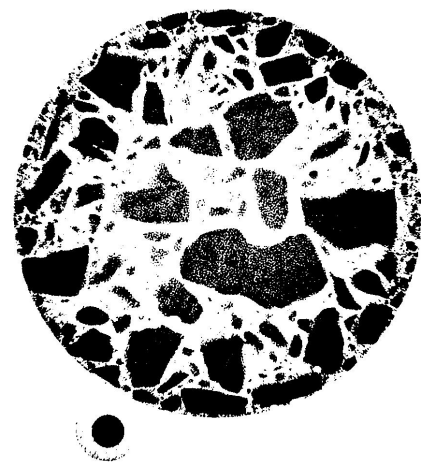


図-11 骨材とモルタルの二値化画像

し、供試体下部での値は上部のそれに比較して大きい。これは、供試体作製時の材料分離などの影響により骨材が下部に移動したためと考えられる。

最後に、モルタルの平均 CT 値分布を検討した。空隙-モルタル境界 CT 値と骨材-モルタル境界 CT 値で挟まれた領域はモルタルの CT 値分布と考えられ、この領

域の平均 CT 値をモルタル平均 CT 値とした。この値を撮影位置ごとにプロットすると図-14 のようである。CT 値は密度に比例するので、この図は相対的なモルタル密度分布と見なすことができる。供試体上部の密度は下部のそれに比較して小さい。これは、ブリーディングの影響と考えられる。また、供試体内でほぼ線形に分布していることがわかる。

このように、型枠を用いて作製した供試体であっても撮影する位置によってそれら値は供試体内で分布していることが明らかである。したがって、原位置から採取した 1 軸圧縮試験用のコアなどの材料構成特性を評価したい場合は、破壊試験の前に 10 断面程度の X 線 CT 撮影を実施してそれぞれの値を評価し、それらの平均値をコアの材料構成特性の代表値とすることが望ましいと考えられる。

6. おわりに

本論文では、X 線 CT 法を用いてコンクリートの材料構成の定量化を行うため、コンクリートの断面画像の CT 値のヒストグラムを用いて、骨材、モルタル、空隙に区分し、それら材料構成の定量化法を提案した。

材料の境界 CT 値を評価する方法として、空隙とモルタルの境界 CT 値については、CT 値のヒストグラムから特徴点を見出し、微分処理を行うことでしきい値を決定し、一方、骨材とモルタルの境界 CT 値については、供試体とともに撮影したファントムを用いてしきい値を決定した。この結果、境界 CT 値を精度よく、かつ、客観的に決定することが可能となった。また、それらを用いて構成材料の空隙面積率、骨材面積率およびモルタルの相対密度分布を定量化することができることを具体的に示した。

さらに、原位置から採取した 1 軸圧縮試験用のコアなどの材料構成特性を評価する場合は、10 断面程度の X 線 CT 撮影を実施してそれぞれの値を評価し、それらの平均値をコアの材料構成特性の代表値とすることが望ましいと論じた。

参考文献

- 1) 社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術，基礎編，社団法人日本コンクリート工学協会，p.139，2007
- 2) T. Temmyo, T. Tsutsumi, Y. Murakami, Y. Obara : Estimation of structural characteristics of RCD by an X-ray CT method, Geo-X 2003, X-ray CT for Geomaterials, Soiles, Concrete, Rocks, pp.199-205, 2003.
- 3) T. Temmyo, Y. Murakami, Y. Obara : Evaluation of Water

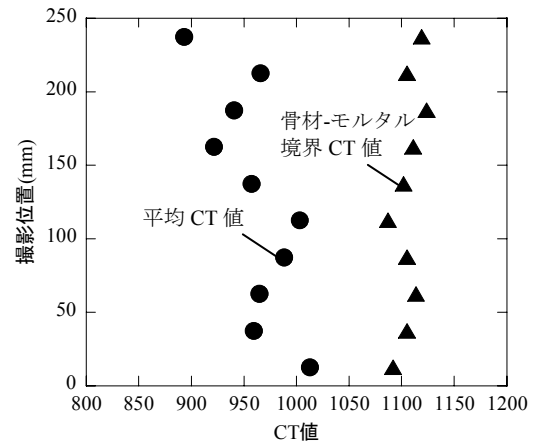


図-12 ファントムによる骨材とモルタルの境界 CT 値とモルタル供試体の平均 CT 値

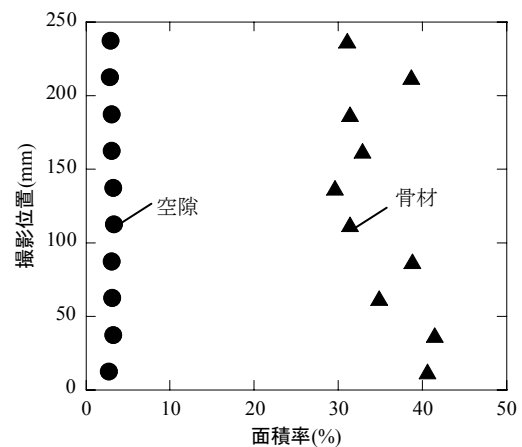


図-13 コンクリート供試体の空隙面積率と骨材面積率

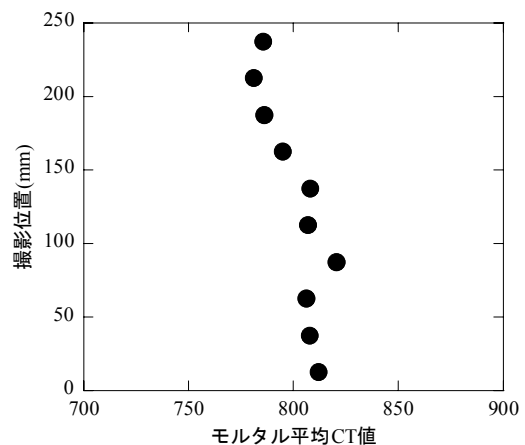


図-14 コンクリート供試体のモルタル平均 CT 値

Cement Ratio of Hardened Concrete by X-ray CT Method, Advances in X-ray Tomography for Geomaterials, pp.443-449, 2006.

- 4) 高木幹雄，下田陽久：新編画像解析ハンドブック，東京大学出版会，pp.1519-1523，2001