

第4章 X線 CT法を用いた材料構成定量化法の開発¹⁾

4.1 緒言

コンクリートは骨材、水、セメントを主たる材料として構成されている。コンクリートに使用される骨材はその粒径により、5mmを境として粗骨材、細骨材に分けられる。練混ぜによってこれらの材料が均一に混合され、さらに空気が混入あるいは連行される。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である骨材や水、セメント、空隙の分布特性やその配合比率などに影響されると考えられる。

第3章で述べたように、X線 CT法では直径150mmの撮影領域に対して、1024×1024のピクセルで撮影したとしても、厚さが1mmまたは2mmのボクセルとしてCT値が設定されることから、判別可能なコンクリート骨材の粒径は1mm程度となる。セメント粒子は粒径が40 μ m以下であり、当然ながら判別は不可能である。また、土木学会標準示方書によると、細骨材の標準粒度は1.2mmの通過百分率が50~90%であり、大部分の細骨材はX線 CTによる判別が困難であることがわかる。セメントと大部分の細骨材の判別が不可能であることから、X線 CT法ではセメントと細骨材と水の混合物すなわちモルタルをひとつの構成材料として判別することが適当であると考えられる。一般的なコンクリートの粗骨材の密度は2.6g/cm³程度、モルタルの密度は1.9g/cm³程度であり、X線 CT法では画像でこの判別が十分に可能である。

一方、コンクリートの練混ぜにより連行される空気によって生じる空隙もX線 CT画像で判別できるが、コンクリート中の空気の粒径別の測定方法²⁾によると、X線 CTによる空気量の測定では粒径1mm以上のエントラップドエアが測定可能となっている。

したがって、X線 CT法をコンクリート供試体に適用する際には、コンクリートの構成を粗骨材、モルタルおよび粒径約1mm以上の空隙に分けることにより、それぞれの密度や構成材料が占める比率などを評価することが可能となり、その結果コンクリートの物性などの諸特性が評価可能になる。具体的には、コンクリート中に占める骨材の割合や密度、空隙の占める割合、そしてモルタルの密度からは、水セメント比の相違など配合上の特性が評価できると考えられる。ただし、ここでいう粗骨材と細骨材はコンクリート工学で定義される粒径5mmが境界ではなく、X線 CT法で判別される粒径、すなわち粒径約1mmが境界となる。

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。しかしながら実際には、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り、骨、血管、水など、着目すべき対象に合わせてしきい値を設定したCT画像を用いて診断している。

一方、コンクリート診断など工学的な判断を行う場合にはより客観的な方法でCT画像を処理する必要がある。すなわち、医療診断で実施するような主観的な方法でしきい値を設定してコンクリートの材料構成を定量化すると、コンクリートの構成材料の密度や寸法が精度よく把握できず、コンクリートの物性を正確に評価できないことになる。しかし、コンクリートの材料構成を客観的な方法で処理を行って定量化した例は少なく、実用できる定量化方法の開発が望まれている。

本章では、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、粒径約1mm以上の骨材、粒径約1mm以下の比較的小さな骨材と空隙を含むモルタル、粒径約1mm以上の大きな空隙とに分け、それら材料構成の定量化法を開発する。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、この方法を作製したコンクリート供試体に適用し、コンクリート内の空隙率、骨材率およびモルタル平均CT値を定量化し、その精度について検証する。

4.2 コンクリート供試体の構成材料

φ125mmのコンクリート円柱供試体のX線CT画像の一例を図-4.1に示す。ここでは、表-4.1に示すような条件で撮影を行っている。X線CTスキャナの解像度は領域のφ150mmに対して1024×1024ピクセルであるため、各ピクセルの一辺の長さは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0.146mm×0.146mm×2.0mmのボクセルに与えられている。このコンクリート断面画像から、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。ここ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-4.2は図-4.1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。

表-4.1 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	φ150mm
表示画素数	1024×1024 pixels

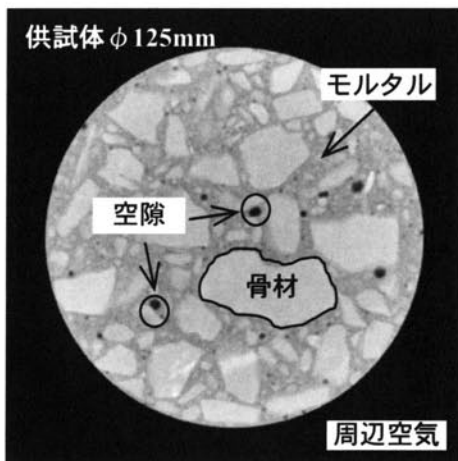


図-4.1 コンクリートのCT画像

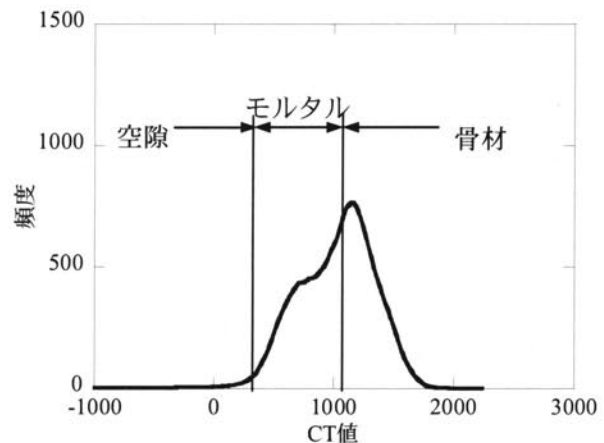


図-4.2 CT値の頻度分布(ヒストグラム)

4.3 一般的な画像処理方法

4.3.1 概説

画像上の目的とする対象物の形を抽出する方法には二値化処理，輪郭を抽出する方法にはエッジ処理がある。ここでは，一般的な画像処理方法として，これらの概要を述べる。

4.3.2 二値化処理^{3), 4), 5)}

二値化とは，画像上の目的とする対象物の形のみを抽出するための基本的な画像処理方法である。この手法によって抽出された画像は0と1の2階調のみで表示され，二値画像と呼ばれる。二値画像は形状解析など，画像演算の理論の体系化が進んでいるため，多階調画像に対しても，いったん二値化を行ってから処理をすることが効率的であり，頻繁に行われている。

二値化では，濃度値の中のある基準値から高い値を0，低い値を1と変換する。この基準値のことをしきい値と呼ぶ。対象と背景の濃淡がはっきりとしている画像ではしきい値は容易に決定できるが，複雑に濃淡が散在している場合はしきい値の決定は困難である。そのためしきい値の決定方法が各種提案されているので，以下に説明する。

(1) 固定しきい値処理(モード法)

あるしきい値 T を境にして二値化する，最も簡単な手法である。すなわち

$$y_{i,j} = \begin{cases} 1, & x_{i,j} > T \\ 0, & x_{i,j} \leq T \end{cases} \quad (4.1)$$

$y_{i,j}$: 座標 (i,j) における二値化後の濃度値

$x_{i,j}$: 座標 (i,j) における濃度値

しきい値 T はユーザが濃度ヒストグラムや二値化結果を見比べながら決定する。対象画像の状態などに大きな変化がなければ，このようにして一度決定したしきい値をすべての画像に適用することができる。しかしこの手法は物体内部の可視化などのときは有効ではあるが，人的要素が加わるため定量的な情報を得ようというときには信頼性にかける。

(2) しきい値自動決定法

ある一定条件を満たしたしきい値を用いて二値化処理をする手法である。このしきい値自動決定方法の主な手法を以下に示す。

1) p タイル法

画像内で対象物の面積比率 p が既知であるとき、二値化処理を行うときに 1 とする画素を面積比率 p となるようにしきい値 T を決定する手法を p タイル法と呼ぶ。この手法はしきい値自動決定法の中で最も簡単な方法である。

図-4.3 のように画像全体の面積 S と面積比率 p を求め、対象物の面積が全画素数に対して p の割合となるしきい値 T を求めればよい。

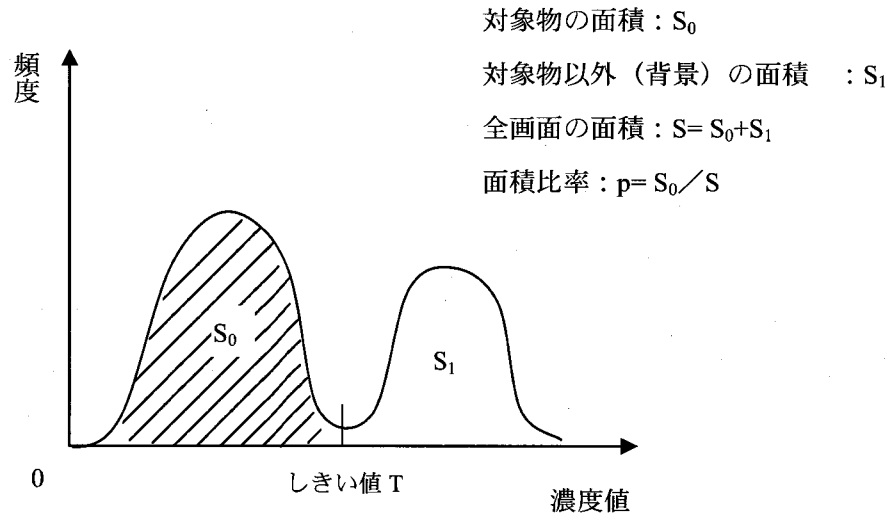


図-4.3 濃度ヒストグラム

2) 判別分析法 (大津の方法)

対象物の濃度と、背景の濃度とがそれぞれ最もよくまとまり、かつ対象物と背景との違いが際立つようにしきい値を求める方法である。

すなわち、しきい値 T で画像を 2 つのクラスに分けたときに、その 2 つのクラス間分散の各クラス内分散に対する比の値が最も大きくなるようにしきい値 T を決める。ここで、クラス間分散が大きいことは背景と対象物がよく分離されていることであり、またクラス内分散が小さいことは対象物および背景がそれぞれよくひとつにまとまっていることを示す。それぞれの式は以下のようになる。

$$\text{クラス内分散 } \sigma_W^2 = \frac{n_1 \sigma_1^2 + n_2 \sigma_2^2}{n_1 + n_2} \quad (4.2)$$

$$\text{クラス間分散 } \sigma_B^2 = \frac{n_1 (\mu_1 - \mu_T)^2 + n_2 (\mu_2 - \mu_T)^2}{n_1 + n_2} \quad (4.3)$$

μ_T : 全画素の濃度の平均値

σ_i : 濃度 T で分けたときのクラス i の分散

μ_i : 濃度 T で分けたときのクラス i の平均値

n_i : 濃度 T で分けたときのクラス i の画素数

(3) 動的しきい値処理

ひとつの画像中に陰影によって明るさに変化が生じ、固定しきい値処理やしきい値自動決定法など、一つのしきい値では対応できないとき、この方法を用いる。つまりはひとつの画像で都合のよいようにしきい値をいくつも設定する手法である。

1) 移動平均法

まず、画像の各画素に移動平均を行い、各画素の輝度とその局所平均値を比較して二値化を行う方法。すなわち、

$$y_{i,j} = \begin{cases} 1, & x_{i,j} > a_{i,j} \\ 0, & x_{i,j} \leq a_{i,j} \end{cases} \quad (4.4)$$

このとき $y_{i,j}$: 二値化後のある画素の輝度

$x_{i,j}$: 二値化前のある画素の輝度

$a_{i,j}$: ある画素を局所平均したときの輝度

2) 部分画像分割法

画像を複数の部分画像に分割し、それぞれで最適しきい値を上記のしきい値自動決定法手法で自動決定し、それらをなだらかにつないだ「しきい面」によって画像を二値化する方法である。

4. 3. 3 エッジ処理^{6), 7), 8)}

エッジ処理とは、画像の明るさの変化によりオブジェクトの輪郭を算出する手法であり、理論的にもオーソライズされた方法とみなすことができる。

エッジ画像処理とは、画像の明るさの変化により、画像処理においてオブジェクトの識別をすするため重要な要素である輪郭を算出することである。明るさの変化値は、微分演算を利用することで算出できる。

例えば、図-4.4の画像モデルの点線部の輝度を表示すると図-4.5のようになる。図-4.4の(a), (b)地点は図-4.5の(a), (b)地点に当たる。このような輝度の大きな変化が生じた画素をエッジと判断し、抽出を行う。

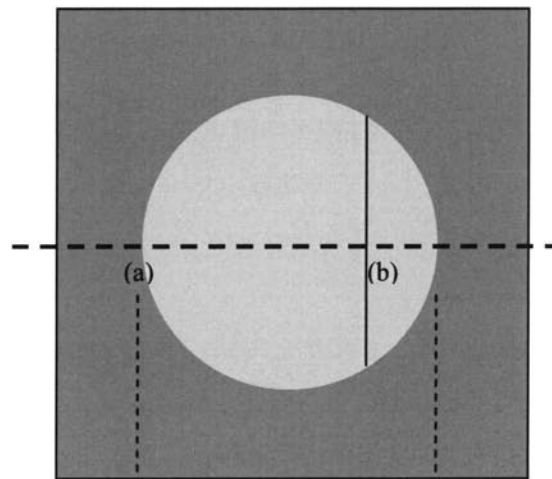


図-4.4 画像モデル

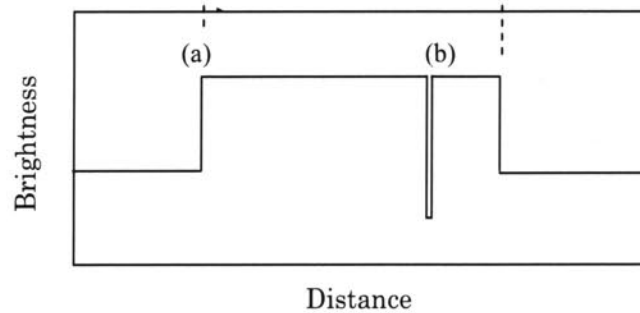


図-4.5 点線部の輝度

エッジ処理の方法として、隣接する画素間の明るさの差分を取ることが最も簡単である。ところが、デジタル画像は連続ではないため、厳密には微分演算は実施できない。そこで、隣接する画素の微分値の近似値を差分により算出する必要がある。隣接する画像の差分は、微分パラメータを用いて画素に重みをつけることにより算出できる。この差分値が隣接する画素の微分値の近似値となる。

ただし、通常の差分演算を行うと、画面に含まれるノイズ成分にも反応してしまうため、ノイズの低減と除去の両方の働きを持つフィルタをかける場合がある。エッジ画像処理を行う差分処理（フィルタ）には以下に示すようなものがある。

(1) 一次微分フィルタ

微分演算は差分をとることによって実施する。 x および y 方向の微分はそれぞれ以下の式で表される。

$$\Delta_x f = \frac{f[i+1, j] - f[i, j]}{i+1-i} = f[i+1, j] - f[i, j] \quad (4.5)$$

$$\Delta yf = \frac{f[i+1, j] - f[i, j]}{i+1-i} = f[i+1, j] - f[i, j] \quad (4.6)$$

これは、座標 $(i+1/2, j+1/2)$ の点における微分値を表している。

これらの微分値は方向性を持っており、エッジの方向に依存しないエッジ画像の強さを求めるには、次式のように勾配の大きさを利用する。

$$g[i, j] = \sqrt{(\Delta xf)^2 + (\Delta yf)^2} \quad (4.7)$$

また、勾配の方向は以下の式で求められる。

$$\theta[i, j] = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta yf}{\Delta xf} \right) \quad (4.8)$$

(2) Gradient フィルタ

一次微分フィルタと同様であるが座標値が (i, j) の点における微分値を求める。

(3) Roberts フィルタ

Roberts フィルタは、斜め方向の画素の濃度差を利用したエッジ検出フィルタであり、微分は以下の式で表される。

$$\Delta uf = f[i, j] - f[i+1, j+1] \quad (4.9)$$

$$\Delta vf = f[i, j+1] - f[i+1, j] \quad (4.10)$$

(4) Prewitt フィルタ

Prewitt フィルタは、差分演算を行う場合のノイズの解消のために、近傍領域に拡張して平滑化したフィルタである。ある注目画素を中心とした上下左右の9つの画素値に対して、以下に示すような係数をそれぞれ乗算し、結果を合計する。垂直方向、水平方向の二つの係数行列を用いてこの処理を行う。

1	0	-1
1	0	-1
1	0	-1

x 方向

1	1	1
0	0	0
-1	-1	-1

y 方向

(5) Sobel フィルタ

Sobel フィルタは、ノイズの抑止を考慮したエッジ検出フィルタのひとつであり、Prewitt フィルタに対して中心の重みを大きくしたフィルタである。ある注目画素を中心とした上下左右の画素値に対しては、以下のような係数を乗算し、結果を合計する。

1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

x 方向

1	2	1
0	0	0
-1	-2	-1

y 方向

本研究では、汎用ソフト“ImageJ”⁹⁾を用いて画像分析を行っているが、本ソフトではこの Sobel フィルタを用いている。ImageJ はアメリカ国立衛生研究所 (NIH) で開発されたオープンソースの画像処理ソフトウェアであり、Mac OS X, Mac OS, Windows, Linux, ザウルス用のソフトウェアが開発サイトから入手できる。ソースコードも公開されており、科学研究目的の画像解析の際に役立っている。また、各種画像処理を実施するために分かりやすいユーザインタフェースを備えており、ピクセルの数値を元に明確な計算処理を行える。

例えば、図-4.6 のような濃度を持つ画像があったとすれば、この sobel フィルタを用いてエッジ処理を行うと図-4.7 のようになる。図-4.7 の数値を見ると、エッジ処理は抽出したい対象の境界を求められているが、二値化とは異なり、完全な 1 と 0 にするわけではない。

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	5	5	5	5	5	5	1	1
1	1	5	1	1	1	1	5	1	1
1	1	5	1	1	1	1	5	1	1
1	1	5	1	1	1	1	5	1	1
1	1	5	1	1	1	1	5	1	1
1	1	5	1	1	1	1	5	1	1
1	1	5	5	5	5	5	5	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

図-4.6 処理前の画像モデル



4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4	6	13	16	16	16	16	13	6	4
4	13	11	6	0	0	6	11	13	4
4	16	6	17	16	16	17	6	16	4
4	16	0	16	0	0	16	0	16	4
4	16	0	16	0	0	16	0	16	4
4	16	0	16	0	0	16	0	16	4
4	16	0	16	0	0	16	0	16	4
4	16	6	17	16	16	17	6	16	4
4	13	11	6	0	0	6	11	13	4
4	6	13	16	16	16	16	13	6	4
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

図-4.7 エッジ処理後

以上を示したエッジ処理による例を図-4.8に示す。図中の画像は、画像圧縮アルゴリズムの評価におけるサンプル画像として、広く使用されている標準画像ライブラリ SIDBA (1977 年版)¹⁰⁾の一部である画像“lenna”¹¹⁾を使用している。



図-4.8 エッジ処理の例¹²⁾

4.4 空隙-モルタル境界CT値の決定法

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、空隙量を精度よく評価することにより、エントラップドエアの影響を除去し、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。

図-4.1で示したφ125mmのコンクリート円柱供試体のX線CT画像における供試体部のCT値の頻度分布の例を図-4.9に示す。同図において、理論上の空気のCT値は、CT値の定義式、式(3.13)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、供試体に含まれる空気の粒子は小さいものが多く、かつ全体の空気量が少ないことから、 $0.146\text{mm} \times 0.146\text{mm} \times 2\text{mm}$ のボクセルに与えられたCT値は一部に空気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、理論上の空気量も考慮すると、図-4.9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ピ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-4.10(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徐々に頻度が増し、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。ここでは空隙-モルタル境界CT値を $CT(p-m)$ と定義する。

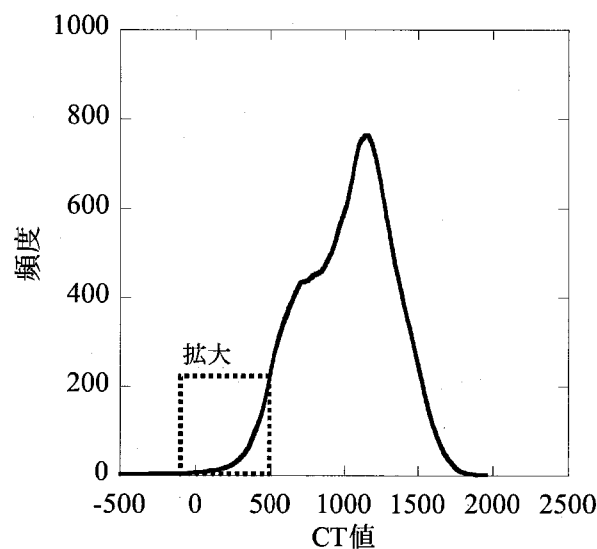


図-4.9 供試体部のCT値の頻度分布の例

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、本章第3節で述べたように、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固定しきい値処理（モード法）がある。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-4.10(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-4.10(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-4.9に示すヒストグラムでの空隙-モルタル境界CT値、 $CT(p-m)$ は361となる。

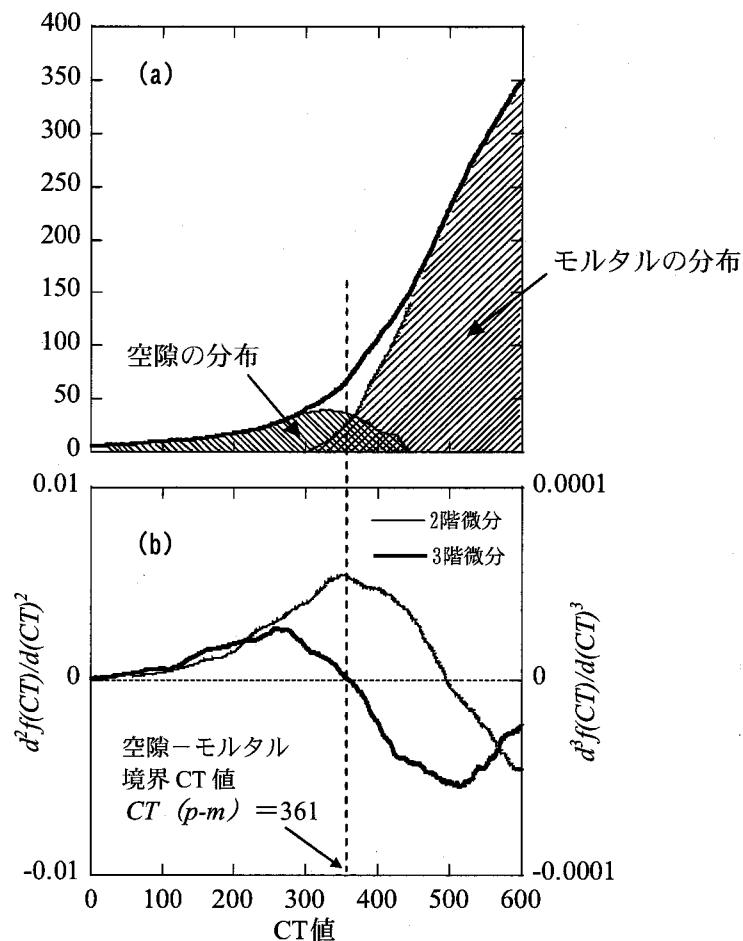


図-4.10 ヒストグラム関数の二階微分と三階微分

4.5 骨材-モルタル境界 CT 値の決定法

4.5.1 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、次にモルタルである。これらの CT 値は図-4.9 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、本章 3 節で述べたしきい値自動決定法である、p タイル法を採用した。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。

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-4.11 に示す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^{13), 14)}、工業分野ではある物体に直径の異なる穴を多数空けて、X 線 CT スキャナの空間分解能の評価などが行われている。

図-4.1 に示したコンクリート供試体と同じ供試体を、ファントムと同時に撮影した画像を図-4.12 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が確認できる。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。

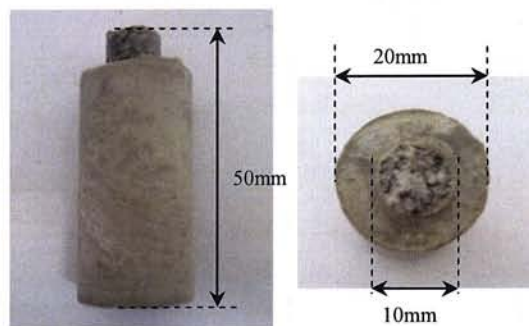


図-4.11 ファントム

4. 5. 2 ファントムによる骨材-モルタル境界 CT 値の決定

骨材-モルタル境界 CT 値の決定は次のようである。まず、ファントムの拡大図である図-4.13 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-4.14 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

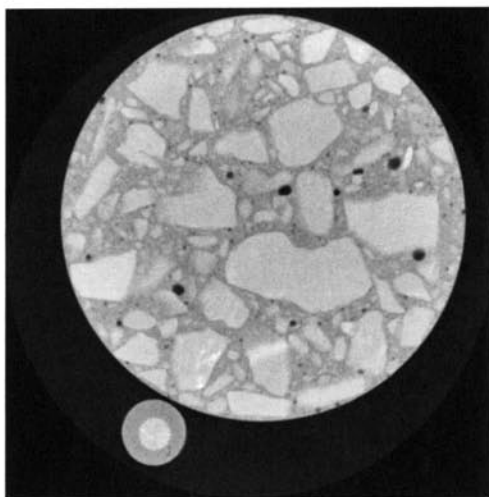


図-4.12 供試体とファントム

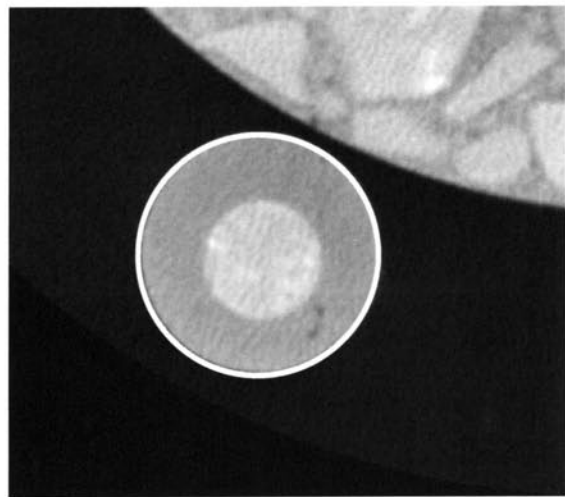


図-4.13 ファントムの拡大図

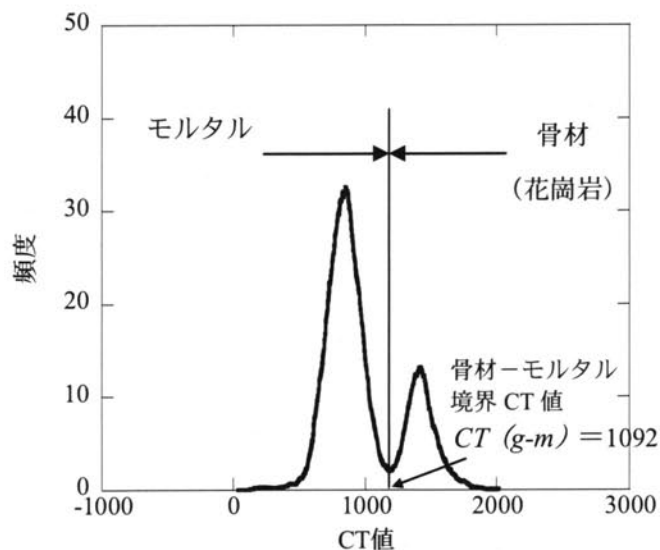


図-4.14 ファントムの CT 値のヒストグラム

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、ピクセルの累積個数が 3680 ピクセルになるときの CT 値が骨材-モルタル境界 CT 値であるとした。ここではこのように決定した骨材-モルタル境界 CT 値を $CT(g-m)$ と定義する。なお、図-4.14 の CT 値のヒストグラムでの境界 CT 値、 $CT(g-m)$ は 1092 である。

4.6 空隙率・骨材率

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-4.15は上述の方法で決定した空隙-モルタルの境界CT値 $CT(p-m)$ 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。ここで、黒い部分の空隙の面積の総和を P_A 、供試体の断面積を A と定義し、 P_A を A で除した値を空隙率 Pr と定義すると、この画像では Pr は2.0%となる。

骨材率も空隙率と同様に、上記の骨材-モルタル境界CT値 $CT(g-m)$ をしきい値として二値化処理を行った画像を図-4.16に示す。骨材を黒、それ以外を白として表示している。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。

図-4.16に示されるコンクリート供試体内の黒い部分の骨材の面積の総和 G_A を定義し、 G_A を供試体の断面積 A で除した値を骨材率 Gr と定義すると、この画像では Gr は45.1%となる。

ここで定義した空隙率や骨材率は断面画像から算定した2次元骨材率であり、実際に3次元的に分布している空隙率、骨材率とは異なっているが、空隙と骨材の割合を表す1つの指標と考えられる。

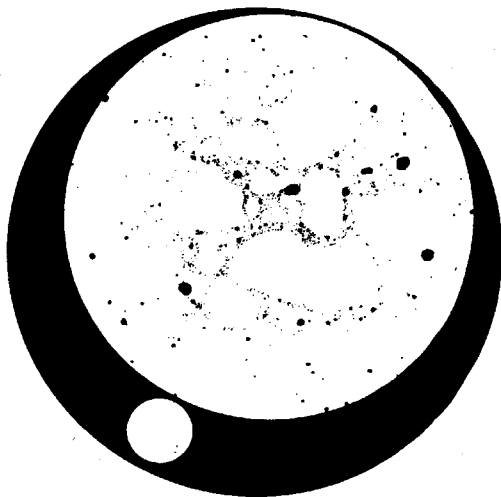


図-4.15 空気とモルタルの二値化画像

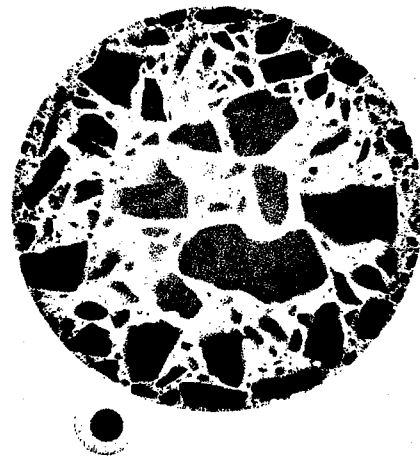


図-4.16 骨材とモルタルの二値化画像

4. 7 モルタル平均 CT 値と水セメント比¹⁵⁾

供試体の断面画像から、CT 値のヒストグラムの空隙と骨材部分のデータを取り除くことにより、供試体のモルタル部分の平均 CT 値を求めることができる。具体的には、コンクリート供試体の CT 値のヒストグラムのデータ上で、空隙の分布とモルタルの分布および、骨材の分布とモルタルの分布をそれぞれの境界 CT 値により、空隙の分布、骨材の分布およびモルタルの分布に分けることができる。モルタル部分の CT 値とそれに対応するピクセル数の積の合計をモルタルの総ピクセルで除することにより、一断面のモルタル平均 CT 値が求まる。このようにして求めた供試体断面のモルタル平均 CT 値を M_{CT} と定義する。図-4.1 に示す画像の供試体部分の CT 値の頻度分布を図-4.17 に示すが、モルタル平均 CT 値 M_{CT} は 811 になる。

モルタル平均 CT 値はモルタルの密度と相関があり、モルタル平均 CT 値が高いほどモルタルの密度が高い。また、モルタルの密度はコンクリートの配合上の水セメント比と相関が高く、モルタルの密度が高いほど水セメント比は小さいと考えられる。

このことを確かめるために、A, B, C の 3 種類の細骨材を用いて配合の異なるモルタル供試体を作製し、X 線 CT 撮影を行い、各供試体の平均 CT 値を求めた。モルタル供試体は 3 種類の異なる細骨材を使用したコンクリートを 5mm ふるいでウエットスクリーニングをしたモルタルを使用した。コンクリート供試体の配合を表-4.2 に示す。3 種類の細骨材を使用していることから、各細骨材を用いて作製された供試体をそれぞれ A (供試体), B (供試体), C (供試体) と呼ぶこととする。なお、供試体は、直径 125mm, 高さ 250mm であり、これらの供試体について、2cm 間隔 10 断面の撮影を行った。

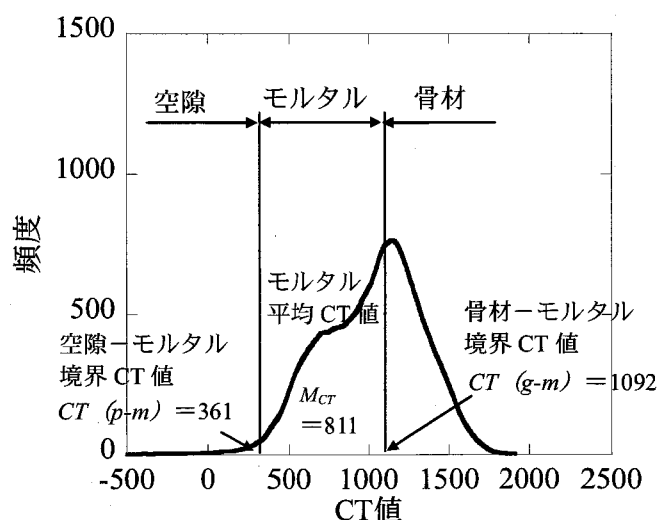


図-4.17 コンクリート供試体部分の CT 値の頻度分布

表-4.2 コンクリート供試体の配合

配合 (A~Cは 細骨材 の種類)	粗骨材の 最大寸法 G _{max} (mm)	目標 スラン プ (cm)	水セメ ント比 (%)	目標 空気量 (%)	細骨材 率 (%)	単位量 (kg/m ³)						
						水	セメント	細骨材	粗骨材		混和剤	
									40-20mm	20-5mm		
						<i>W</i>	<i>C</i>	<i>S</i>	<i>G1</i>	<i>G2</i>	<i>A1</i>	<i>A2</i>
A-1	40	8	45	4.5	40	178	396	691	524	524	0.99	0.049
A-2	40	8	55	4.5	38	170	309	692	571	571	0.77	0.039
A-3	40	8	55	4.5	40	172	313	725	550	550	0.78	0.039
A-4	40	8	55	4.5	42	176	320	754	527	527	0.80	0.040
A-5	40	8	55	4.5	44	180	327	783	504	504	0.82	0.041
A-6	40	8	65	4.5	40	172	265	741	562	562	0.66	0.040
A-7	40	8	75	4.5	40	177	236	746	565	565	0.59	0.041
B-1	40	8	45	4.5	40	150	333	733	562	562	0.83	0.025
B-2	40	8	55	4.5	40	150	273	753	578	578	0.68	0.027
B-3	40	8	65	4.5	40	152	234	764	586	586	0.59	0.023
B-4	40	8	75	4.5	40	152	203	774	594	594	0.51	0.020
C-1	40	8	45	4.5	40	146	324	757	568	568	0.81	0.032
C-2	40	8	55	4.5	40	146	265	777	583	583	0.66	0.027
C-3	40	8	65	4.5	40	146	225	791	593	593	0.56	0.022
C-4	40	8	75	4.5	40	146	195	801	601	601	0.49	0.019

各モルタル供試体について、水セメント比と密度(単位容積質量)の関係を求めた結果を図-4.18に示す。モルタル供試体は使用するセメントや骨材が同じであれば、水セメント比と密度は概ね反比例の関係にある。

また、同じモルタル供試体について測定した密度(単位容積質量)と供試体のモルタル平均CT値の関係を図-4.19に示す。供試体のモルタル平均CT値は、10断面のモルタル平均CT値の平均値としている。X線CT法で用いるCT値はX線吸収係数であり、対象物の密度に比例することから、モルタル供試体の密度はモルタル平均CT値に比例するといえる。一方、図-4.20はモルタル供試体の平均CT値と水セメント比の関係を示した図である。水セメント比とモルタル平均CT値の関係は概ね反比例の関係にある。図-4.20によると、同じ材料を用いたコンクリートであれば、モルタル供試体の平均CT値と水セメント比の関係は相関が高いが、骨材の種類や細骨材率が変わるとばらつきが生じ、水セメント比とモルタル平均CT値の関係は材料毎に若干異なるものとなる。

コンクリート供試体の構造特性の評価にあたっては、まず図-4.20のような水セメント比-モルタル平均CT値の相関関係を材料や配合が既知であるコンクリートを基に作成する。そして、その材料を用いて施工されたコンクリート構造物から採取したコア供試体に対して、材料構成定量化法で求めたモルタル平均CT値を作成したモルタル平均CT値-水セメント比の相関関係に導入することにより、構造物のコンクリートの水セメント比を評価する。具体的な評価方法については、第5章で詳しく述べる。

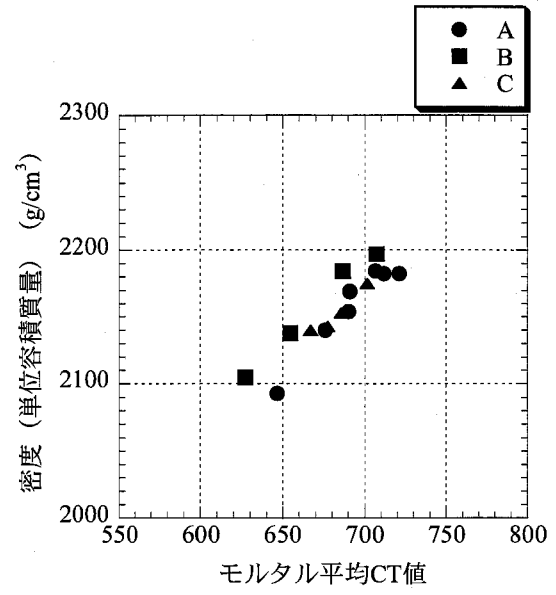
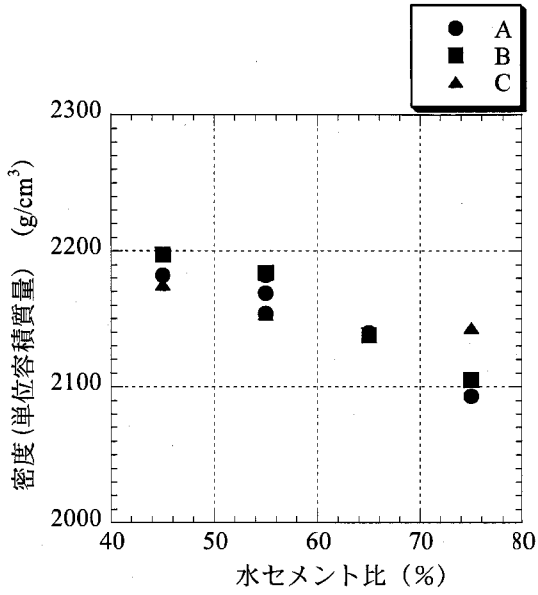


図-4.18 モルタル供試体の密度と水セメント比 図-4.19 モルタル供試体の密度と平均CT値

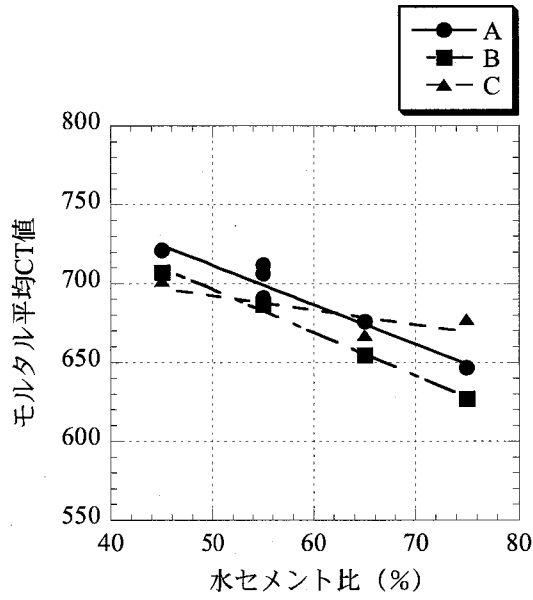


図-4.20 モルタル供試体の平均CT値と水セメント比

4.8 粒度分布

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図-4.16の二値化画像から骨材の粒度分布を評価した。画像処理ソフト“Image J”には「粒子解析」という機能があり、二値化された画像にある対象物を数えたり、測定を実施したりすることが可能である。すなわち、二値化画像の対象物のひとつひとつの塊を骨材の粒子とみなし、その対象物の粒子の個数や全粒子面積、平均粒子サイズなどを求め、その粒子の塊が完全な円であると近似することで面積から求めた直径とその累積数を粒度分布として表す。「粒子解析」のイメージを図-4.21に示す。同図で「粒子解析」を行った結果は、粒子の個数は127個、粒子の総面積は50,358ピクセル(1,080mm²)、粒子の平均面積は396ピクセル(8.5mm²)、最大粒子は26,370ピクセル(565.8mm²)である。

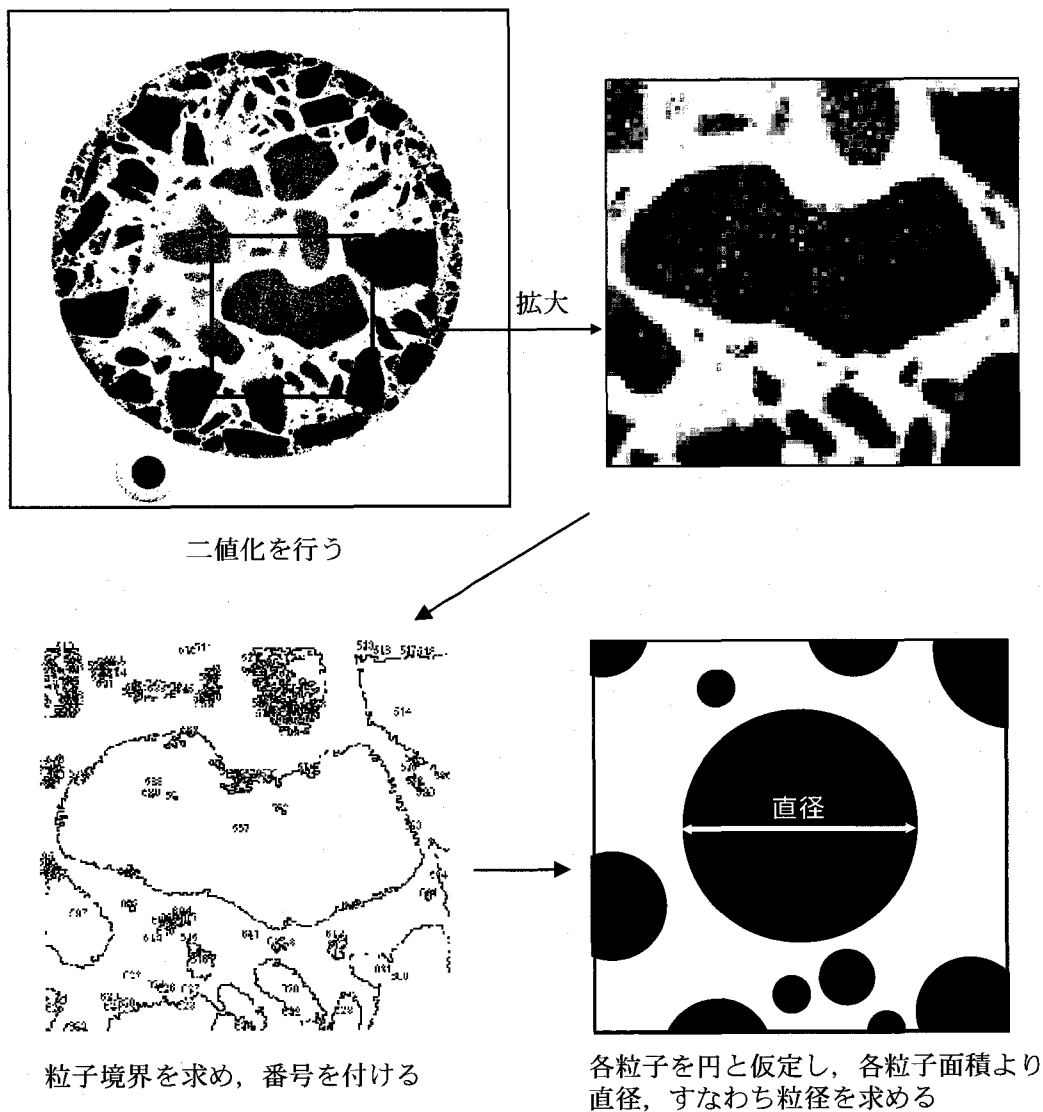


図-4.21 粗骨材の粒径の求め方

この画像処理によって得られた推定粒度分布を図-4.22に示す。赤の実線が推定した粒度分布であり、黒の実線が骨材試験（粒度試験）と配合より求めた実際の粒度分布である。また、黒の点線はBS 882（1992）によるコンクリート骨材の標準粒度分布¹⁶⁾の上限、下限である。図-4.22では推定粒度分布は粗粒側に大きく乖離している。“Image J”の画像処理によって得られた推定粒度分布は供試体を代表する一断面の2次元データであり、ふるいわけ試験によって求められる実際の粒度分布とは異なるものである。特に、X線CT法で推定した粒度分布は、粒径10mm以下の細かい粒度の骨材が少なく、評価されていない。これは、X線CT撮影の解像度が細かい骨材粒子を評価していないためと考えられる。

そこで、X線CT法による粒度の評価において、粒度の小さいものを除いて評価を行うために、骨材の最小粒径を(a)0.3mm、(b)1.2mmとして各粒度分布を再計算した。粒度分布は、0.3mmおよび1.2mm以下の骨材を除いた全体の骨材に対する各粒径の通過百分率を求めた。図-4.23(a)、(b)にそれぞれの推定粒度分布、実際の粒度分布、標準粒度分布を示す。

図-4.23より、(b)の粒径1.2mm以上として骨材の粒度解析を実施して得られた推定粒度分布が実際の粒度分布に近いことがわかる。すなわち、粒径約1mmの骨材であれば、X線CT法によって粒度分布を推定できる可能性があることを示している。この粒径はX線CT法で評価可能な空隙の径が直径1mm以上とされていること²⁾と一致している。

X線CT法による骨材の粒度分布の評価では、代表する2次元断面での評価となるため、実際に通過するふるいの寸法で評価を行う実際の粒度分布とは異なることから、精度の高い評価は期待できないが、粒径が約1mm以上の骨材を評価する場合には、実際の粒度分布に近い粒度分布が得られる可能性がある。

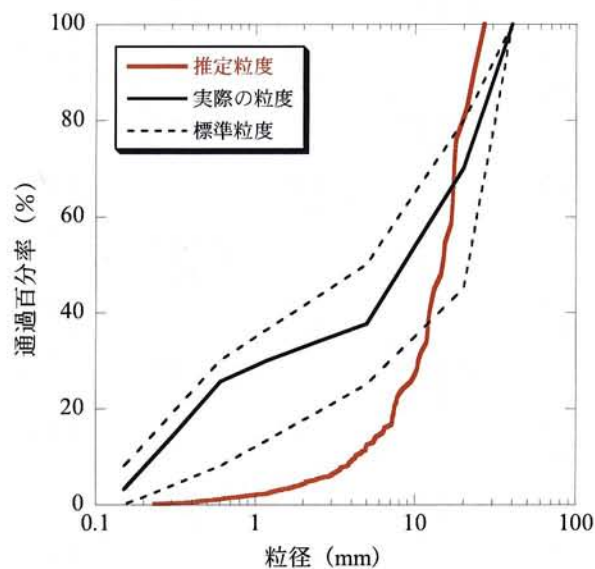
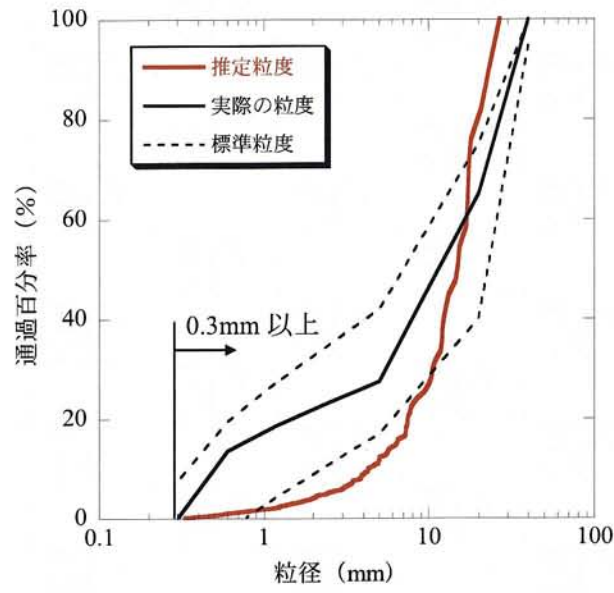
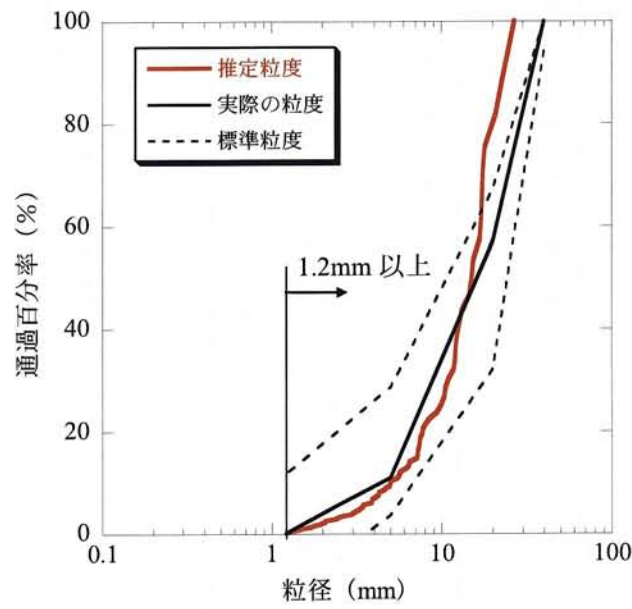


図-4.22 推定粒度曲線（全粒径）



(a) 粒径 0.3mm 以上を評価



(b) 粒径 1.2mm 以上を評価

図-4.23 推定粒度曲線 (粒径 0.3mm 以上と粒径 1.2mm 以上)

4. 9 供試体内の材料分布性状と撮影方法

材料構成定量化法を用いて、 $\phi 125\text{mm}$ 、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、コンクリートの構造特性の評価を行った。コンクリートの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開発した材料構成定量化法を適用して各断面の空隙率 P_r および骨材率 G_r を評価した。

撮影位置と評価された断面の空隙率 P_r および骨材率 G_r を図-4. 24 に示す。空隙率は場所によらずほぼ一定の値を示すが、骨材率はばらついている。しかし、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可能性が考えられる。

次に、断面のモルタル平均 CT 値 M_{CT} を撮影位置毎にプロットしたものを図-4. 25 に示す。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、ブリーディングが影響を及ぼし、密度の小さい水が上部に移動したことが原因と考えられる。

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の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する場合には、破壊試験の前に複数断面程度の 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。圧縮強度試験などで用いられるコンクリート円柱供試体の寸法は、一般に直径の 2 倍の高さである。したがって、図-4. 24 や図-4. 25 に示したように、直径が 125mm 程度の円柱供試体であれば、 10 断面程度の撮影を行うことにより、供試体内の空隙率や骨材率、モルタル平均 CT 値の分布状況が把握でき、それぞれの平均値をとることによって、供試体全体の代表値が得られると考えられる。

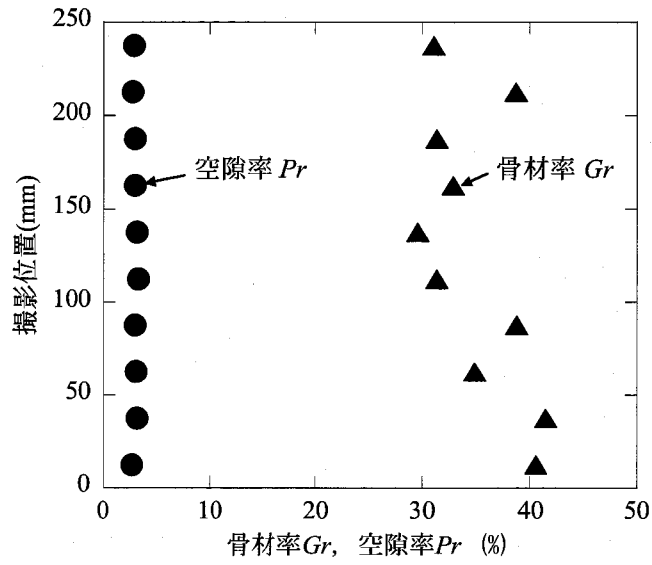


図-4.24 コンクリート供試体の空隙率と骨材率の分布

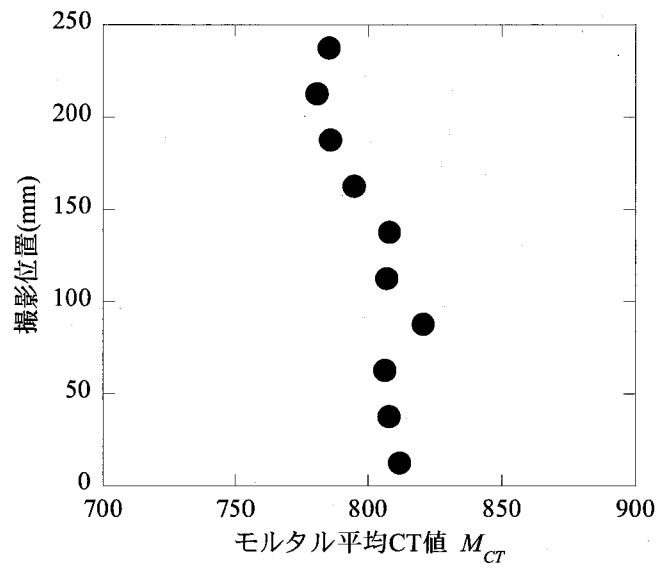


図-4.25 コンクリート供試体のモルタル平均 CT 値の分布

4.10 結言

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。

本章では,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新たに開発した。

具体的には,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,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率,骨材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供試体などの材料構成特性を評価する場合は,直径125mm程度の円柱供試体であれば,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供試体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】(第4章)

- 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, 日本コンクリート工学協会, Vol.30, No.2, pp.739-744, 2008.6
- 2) 笠井芳夫, 池田尚治, “コンクリートの試験方法(下)”, 技術書院, p.37, 1993
- 3) 高木幹雄, 下田陽久, “画像解析ハンドブック”, 東京大学出版会, pp.1520-1534
- 4) 村上伸一, “画像処理工学”, 東京電機大学出版局, pp.28-33
- 5) 安居院猛, 中嶋正之, “画像情報処理”, 森北出版株式会社
- 6) 木村誠聡, 田口 亮, 村田 裕, “ファジー推論を用いた雑音画像からのエッジ抽出法”, 信学論(A), J80-A, No.9, pp.1490-1498, 1997
- 7) 安居院猛, 長尾智晴, “画像の処理と認識”, 昭晃堂
- 8) 谷口慶治編, “画像処理工学基礎編” 共立出版, 1996
- 9) Image J 公式ウェブサイト (<http://rsb.info.nih.gov/ij/>)
- 10) 京都大学大学院情報学研究科松山研究室ウェブサイト (http://vision.kuee.kyoto-u.ac.jp/IUE/IMAGE_DATABASE/STD_IMAGES/)
- 11) 標準画像 “Lenna”ウェブサイト (<http://www.cs.cmu.edu/~chuck/lennapg/lenna.shtml>)
- 12) 秋田大学医科学情報学ウェブサイト (<http://www.mis.med.akita-u.ac.jp/~kata/image/sobelprew.html>)
- 13) 八木 浩史, 松井 和歌子, 高松 美和, 竹内 千恵, 中川 幸子, “RMI 156 ファントム画像の画質に関する検討(1) —ファントムの画像濃度と画質との関係—”, 中四国放射線医療技術フォーラム 2005, 2005年10月
- 14) 佐藤真知子, 犬井正男, 茅原功, 伊達隼人, 中越智恵子, 東吉彦, 藤澤健一, “液晶モニタにおけるマンモグラム用ファントムの検出度とSN比の検討”, 医用画像情報学会雑誌, 24(3), pp.12-116, 2007.12
- 15) T.Temmyo, Y.Murakami, Y.Obara, “Evaluation of Water Cement Ratio of Hardened Concrete by X-ray CT Method”, Advances in X-ray Tomography for Geomaterials, pp.443-449, 2006.10
- 16) A.M.Neville, “Properties of Concrete (Fourth edition)”, Pearson Prentice Hall, p.170, 2002

第5章 材料構成定量化法による硬化コンクリートの構造特性評価

5.1 緒言

本章では、前章で提案した材料構成定量化法をコンクリート供試体に適用し、その構造特性評価、すなわち材料や配合の異なるコンクリート供試体の骨材率、空隙率、モルタル平均 CT 値の評価を行う。

材料構成定量化法で求めたモルタル平均 CT 値はモルタルの密度を示しているが、コンクリートの水セメント比とは密接な相関があると考えられる。すなわち水セメント比の小さいコンクリートのモルタルの密度は大きく、水セメント比の大きいコンクリートのモルタルの密度は小さいといえる。したがって、水セメント比の小さいコンクリートはモルタル平均 CT 値が大きく、水セメント比の大きいコンクリートはモルタル平均 CT 値が小さいと考えられる。

同様に、モルタルの密度は単位セメント量とも密接な相関があり、単位セメント量の大きいコンクリートのモルタルの密度は大きく、単位セメント量の小さいコンクリートのモルタルの密度は小さいといえる。この場合は単位セメント量の大きいコンクリートはモルタル平均 CT 値が大きく、単位セメント量の小さいコンクリートはモルタル平均 CT 値が小さくなる。

また、標準的に養生された同材齢のコンクリートの圧縮強度は水セメント比と反比例の関係にある。したがって、水セメント比が小さくモルタル平均 CT 値が大きいコンクリートは圧縮強度が大きく、水セメント比が大きくモルタル平均 CT 値が小さいコンクリートは圧縮強度が小さいと考えられる。

本章では、まず材料構成定量化法を用いて供試体のモルタル平均 CT 値を求め、モルタル平均 CT 値に対する水セメント比、単位セメント量および圧縮強度との相関関係を求める。そして、これらの相関関係を用いて、モルタル平均 CT 値からコンクリートの配合、すなわち水セメント比や単位セメント量、さらには圧縮強度を評価する。

本章第2節では、室内試験室において、異なる3種類の細骨材を用いたコンクリート供試体に材料構成定量化法を適用して、それぞれの空隙率、骨材率やモルタル平均 CT を求める。コンクリートの配合は骨材毎に水セメント比を45~75%と変化させ、水セメント比とモルタル平均 CT 値の関係や単位セメント量とモルタル平均 CT 値の関係などを検討する。

第3節では、九州内の6箇所の生コン工場で製造された材料や配合の異なるコンクリート供試体に対し、空隙率や骨材率とともに、水セメント比、単位セメント量の評価、すなわち、コンクリートの構造特性の評価について、第2節と同様な方法で実施する。

5. 2 室内作製コンクリート供試体への適用¹⁾

5. 2. 1 試験方法

試験で使用するコンクリート供試体とモルタル供試体は室内試験室内で作製した。使用した材料を表-5.1に、コンクリートの基本配合を表-5.2に示す。粗骨材は1種類であるが、細骨材はA, B, Cの3種類の異なる細骨材を使用した。コンクリートの配合は、一般的な土木構造物を対象として考慮し、粗骨材の最大寸法40mm, 目標スランプ8cm, 目標空気量4.5%とした。水セメント比は標準を55%とし、45%~75%の範囲で設定した。細骨材率は40%を基本としてA細骨材を使用した場合のみ、細骨材率を38%~44%と変化させた。空気量は混和剤を用いて調整した。ここでは、各細骨材を用いて作製された供試体をそれぞれA(供試体), B(供試体), C(供試体)と呼ぶ。

コンクリート供試体は直径125mm, 高さ250mmの円柱供試体である。各配合のコンクリート(Gmax40mm)について、5mmふるいでウエットスクリーニングしたモルタル(Gmax5mm)で同じサイズの供試体を作製した。表-5.2に示すコンクリートの基本配合を用いて作製し、X線CT撮影を行ったコンクリート供試体およびモルタル供試体の一覧を表-5.3に示す。

X線CT撮影にあたっては、供試体は水分の状態による変化を防止するために、撮影の前に乾燥炉に入れ、110℃の温度で24時間乾燥させ、その後密閉容器に乾燥剤と共に入れて12時間自然冷却させた後にX線CT撮影を行った。また、撮影は各供試体25mm間隔で10断面行った。一例として、配合C-2のX線CT画像を図-5.1に示す。なお、B(供試体)の全てのX線CT画像を付録-2(巻末資料)に示す。

表-5.1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³
水	つくば市水道水
粗骨材	砂岩 表乾密度 2.68 g/cm ³ , 吸水率 2.68%
細骨材	A: 砂岩 表乾密度 2.65 g/cm ³ , 吸水率 1.47%
	B: 川砂(大井川産) 表乾密度 2.62 g/cm ³ , 吸水率 1.03%
	C: 山砂(君津産) 表乾密度 2.68 g/cm ³ , 吸水率 1.17%
混和剤	AE減水剤 A1, 空気量調整剤 A2

表-5.2 コンクリートの基本配合

配合 (A~Cは 細骨材 の種類)	粗骨材の 最大寸法 Gmax (mm)	目標 スラン プ (cm)	水セメ ント比 (%)	目標 空気量 (%)	細骨材 率 (%)	単位量 (kg/m ³)						
						水	セメント	細骨材	粗骨材		混和剤	
									40-20mm	20-5mm		
						<i>W</i>	<i>C</i>	<i>S</i>	<i>G1</i>	<i>G2</i>	<i>A1</i>	<i>A2</i>
A-1	40	8	45	4.5	40	178	396	691	524	524	0.99	0.049
A-2	40	8	55	4.5	38	170	309	692	571	571	0.77	0.039
A-3	40	8	55	4.5	40	172	313	725	550	550	0.78	0.039
A-4	40	8	55	4.5	42	176	320	754	527	527	0.80	0.040
A-5	40	8	55	4.5	44	180	327	783	504	504	0.82	0.041
A-6	40	8	65	4.5	40	172	265	741	562	562	0.66	0.040
A-7	40	8	75	4.5	40	177	236	746	565	565	0.59	0.041
B-1	40	8	45	4.5	40	150	333	733	562	562	0.83	0.025
B-2	40	8	55	4.5	40	150	273	753	578	578	0.68	0.027
B-3	40	8	65	4.5	40	152	234	764	586	586	0.59	0.023
B-4	40	8	75	4.5	40	152	203	774	594	594	0.51	0.020
C-1	40	8	45	4.5	40	146	324	757	568	568	0.81	0.032
C-2	40	8	55	4.5	40	146	265	777	583	583	0.66	0.027
C-3	40	8	65	4.5	40	146	225	791	593	593	0.56	0.022
C-4	40	8	75	4.5	40	146	195	801	601	601	0.49	0.019

表-5.3 X線 CT 撮影を行ったコンクリートとモルタル供試体の一覧

供試体 (細骨材の 種類)	細骨材率 (%)	水セメント比 (%)							
		45		55		65		75	
		Gmax40mm	Gmax5mm	Gmax40mm	Gmax5mm	Gmax40mm	Gmax5mm	Gmax40mm	Gmax5mm
A	38	—	—	A-3	A-3	—	—	—	—
	40	—	A-1	A-3	A-3	—	A-6	A-7	A-7
	42	—	—	A-4	A-4	—	—	—	—
	44	—	—	A-5	A-5	—	—	—	—
B	40	B-1	B-1	B-2	B-2	B-3	B-3	B-4	B-4
C	40	—	—	C-2	C-2	—	—	C-4	C-4

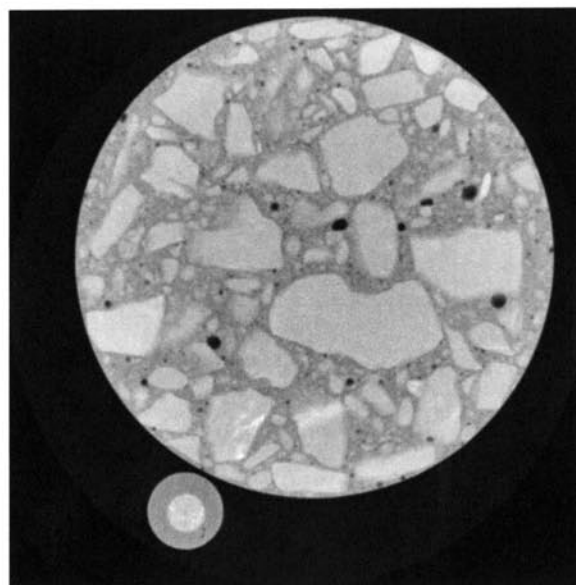


図-5.1 X線 CT 画像の例 (C-2 配合)

試験は、材料構成定量化法を表-5.3に示す供試体に適用し、空隙率と骨材率およびモルタル平均CT値を求め、空隙率や骨材率については供試体の鉛直方向の分布を検討するとともに、配合上の理論値との比較検討を行った。また、モルタル平均CT値の鉛直分布を求め、1本の供試体中のばらつきを評価し、配合の相違がモルタル平均CT値に及ぼす影響を検討した。

次に、供試体各断面のモルタル平均CT値を平均して、供試体全体のモルタル平均CT値を求め、水セメント比や単位セメント量との相関を検討した。そして、モルタル平均CT値から水セメント比や単位セメント量を推定する推定近似式を最小二乗法によって求め、実際の値との比較を行った。本方法によるコンクリートの配合推定の精度を検討するため、水セメント比推定の従来法である「セメント協会法」²⁾と呼ばれる化学分析手法との比較を行った。「セメント協会法」による配合推定は、配合A-1および配合A-6のコンクリート供試体について実施した。

さらに、表-5.2に示した基本配合の全ての配合で作製した、粗骨材の最大寸法40mm (Gmax40mm)のコンクリートの供試体を用いて、材齢7日と材齢28日でJIS A1108による圧縮強度試験を実施した。そして、圧縮強度と水セメント比、モルタルCT値の相関を検討し、モルタル平均CT値から材齢28日の圧縮強度を推定する推定近似式を最小二乗法によって求めた。

また、使用した供試体は全て直径が125mmの円柱供試体であるが、直径の異なる供試体にも適用するために、供試体の直径とモルタル平均CT値の相関を求めた。

最後に、異なる骨材の水セメント比55%の各コンクリートの粒度分布について、第4章で述べた、“Image J”の画像解析機能を用いて2次元的に推定粒度分布を求め、実際の粒度分布やBS882(1992)によるコンクリートの標準粒度分布との比較を行った。

5. 2. 2 空隙率の解析

図-5.2はA, B, Cの各コンクリートの水セメント比が55%、細骨材率が40%の各供試体(配合A-3, B-2, C-2)について、横軸を材料構成定量化法で求めた空隙率 P_r 、縦軸を撮影位置とし、その関係を示したものである。縦軸の0mmは供試体の最下部、250mmは最上部を表す。同図より、供試体の空隙は面積率が2.3%から4.0%の範囲で分布しており、供試体の鉛直方向には一様に分布していることがわかる。

次に、A, B, Cの各供試体について、各断面の空隙率 P_r を平均して求めた値を供試体の空隙率 P_r (mean)と定義する。供試体はφ125mm、直径250mmであり、2.5cm間隔で10断面の撮影を行っていることから、10断面の空隙率 P_r の平均が供試体の空隙率 P_r (mean)となる。そして、本方法で求めたA, B, Cの各供試体の空隙率 P_r (mean)と理論上の空隙率である理論空隙率を比較した。ここで、理論空隙率は供試体作製時に空気室圧力方法(JIS A 1116)で測定した空気量とした。理論空隙率とX線CT法による供試体の空隙率 P_r (mean)の比較を図-5.3に示す。同図は粗骨材の寸法の影響を考慮してGmax40mmのコンクリートとGmax5mmのモルタルで分けて示しているが粗骨材の最大寸法による影響はない。図-5.3より、コンクリート理論空隙率は4~6%

であり、X線CT法で求めた空隙率2~4%よりも大きいことがわかる。

コンクリートの空隙は通常の場合、空気（エントレインドエア）連行剤を用いたコンクリートで4~5%、そうでない場合には2%程度であり³⁾、X線CTによる空気量の測定では粒径1mm以上のエントラップドエアが測定可能⁴⁾とされていることから、X線CT法による空隙率はエントラップドエアを主として評価していると考えられる。

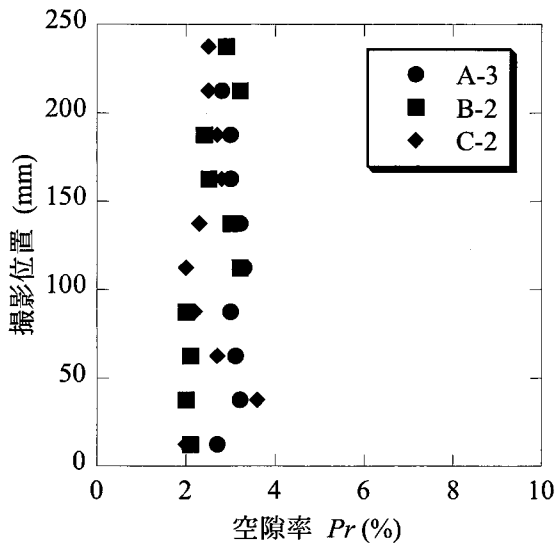


図-5.2 空隙率の鉛直分布

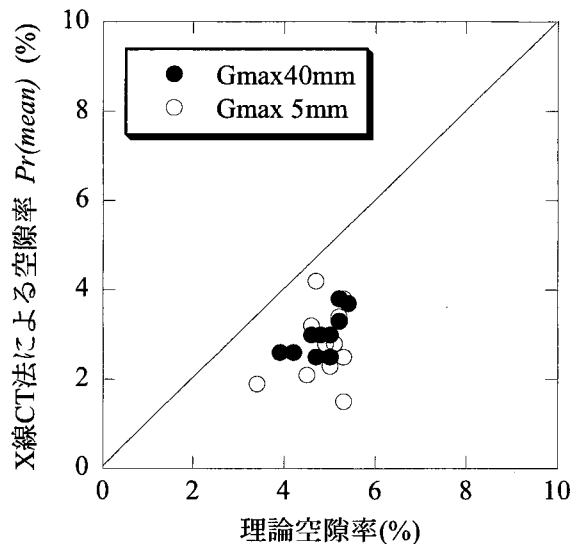


図-5.3 理論空隙率とX線CT法による空隙率

5. 2. 3 骨材率の解析

図-5.4はA, B, Cの各コンクリート (Gmax40mm) の水セメント比が55%, 細骨材率が40%の各供試体 (A-3, B-2, C-2) について、横軸を材料構成定量化法で求めた骨材率 Gr , 縦軸を撮影位置とし、その関係を示したものである。供試体の骨材は30.6%から51.9%の範囲で分布しており、供試体上部のほうが下部に比較して若干小さい値となっている。これは、材料分離により、粗骨材が下部に偏ったためと考えられる。

次に、A, B, Cの各供試体について、各断面の骨材率 Gr を平均して求めた値を供試体の平均骨材率 $Gr (mean)$ と定義する。本方法で求めたA, B, Cの各供試体の骨材率 $Gr (mean)$ と理論骨材率の関係を図-5.5に示す。ここで、理論骨材率はコンクリート供試体全体のかさ容積に対する配合上の粗骨材の容積の比率とした。評価される骨材の大部分は粗骨材であることから、Gmax40mmのコンクリートの骨材率のみを示している。

図-5.5によると、X線CT法による供試体の骨材率 $Gr (mean)$ は理論骨材率よりも小さいことがわかる。骨材率の平均値は36.6%, 理論骨材率の平均値は42.1%であり、その差は4.5%である。材料構成定量化法で評価する骨材率では、実際の骨材率、すなわち配合上の骨材率よりも5%程度小さく評価されていることがわかった。ばらつきはあるものの、相対的には理論骨材率が大きい配合では骨材率も大きく、理論骨材率が小さい配合では骨材率も小さい傾向である。

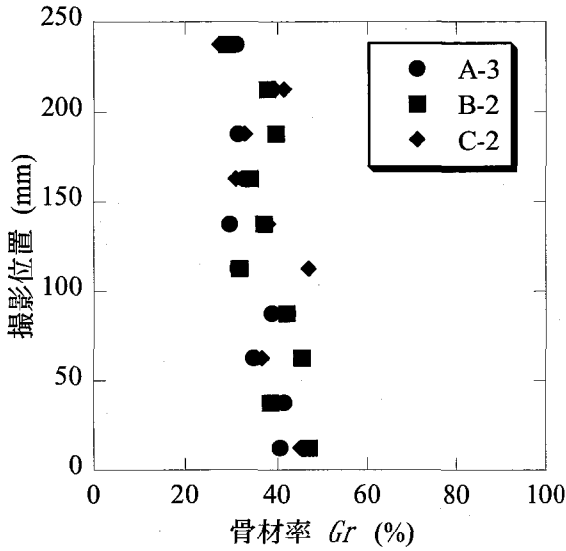


図-5.4 骨材率の鉛直分布

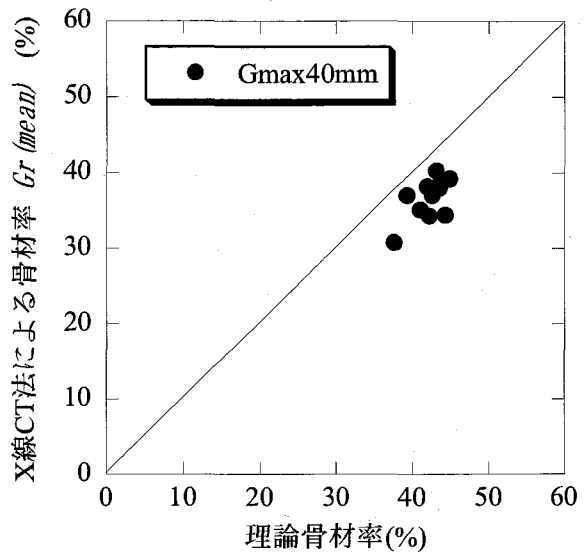


図-5.5 理論骨材率と X 線 CT 法による骨材率

5. 2. 4 モルタル平均 CT 値と水セメント比^{5), 6), 7)}

(1) モルタル平均 CT 値の鉛直分布

1) コンクリート供試体 (Gmax40mm)

図-5.6 は A, B, C の各コンクリート (Gmax40mm) の各配合の供試体について、横軸を材料構成定量化法で求めたモルタル平均 CT 値 M_{CT} 、縦軸を撮影位置とし、その関係を示したものである。

A 供試体については、水セメント比が 55% の配合が水セメント比 75% の配合よりも平均 CT 値 M_{CT} が大きく、いずれの配合においても供試体の上部ほどモルタル平均 CT 値 M_{CT} が小さいことがわかる。モルタル平均 CT 値 M_{CT} は供試体のモルタル部の密度を示していることから、水セメント比の小さいコンクリートほどモルタル部の密度大きく、供試体の上部ほどモルタル部の密度が小さいことを示している。供試体は円柱の型枠にコンクリートを 2 層に分けて詰め、各層で内部振動機を用いた締固めを行っているが、供試体作製時に材料が分離した可能性や作製後の硬化過程においてブリーディングが生じた可能性が考えられる。材料分離やブリーディングが生じるとモルタル中の骨材やセメント、水の分離によって、重いセメントや骨材が下部に沈み、軽い水や空隙 (エントレインドエア) が上部に浮く可能性がある。B 供試体および C 供試体についても同様に、水セメント比が小さい配合ほどモルタル平均 CT 値 M_{CT} が大きく、供試体の上部ほどモルタルの平均 CT 値 M_{CT} が小さい。また、A, B, C の各配合で、水セメント比が小さいと上下のモルタル平均 CT 値 M_{CT} の差は小さく、水セメント比が大きいと上下の M_{CT} の差は大きい。これは、水セメント比の大きい配合ほど材料分離が顕著であったためと考えられる。

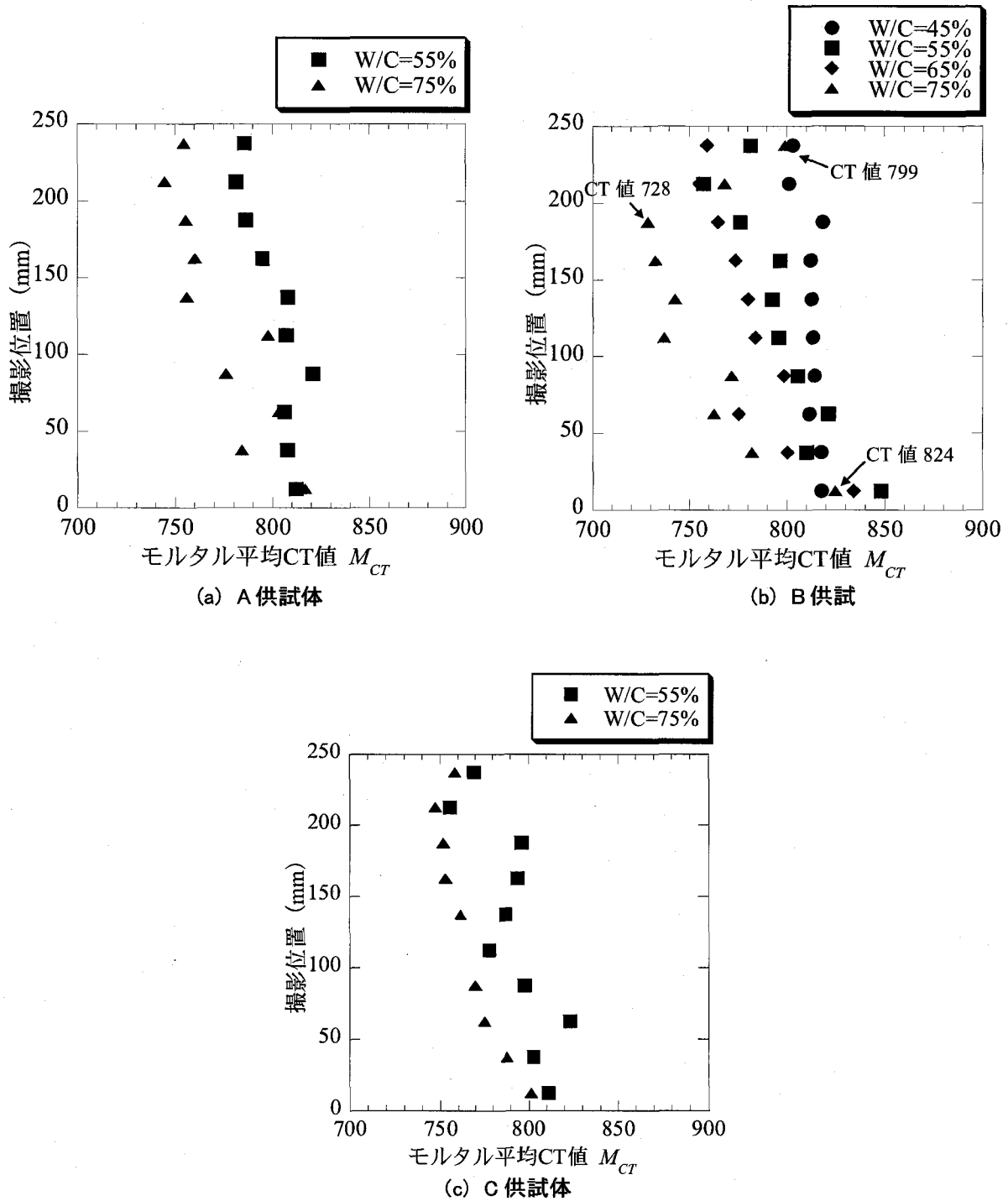


図-5.6 モルタル平均CT値の鉛直分布 (Gmax40mm)

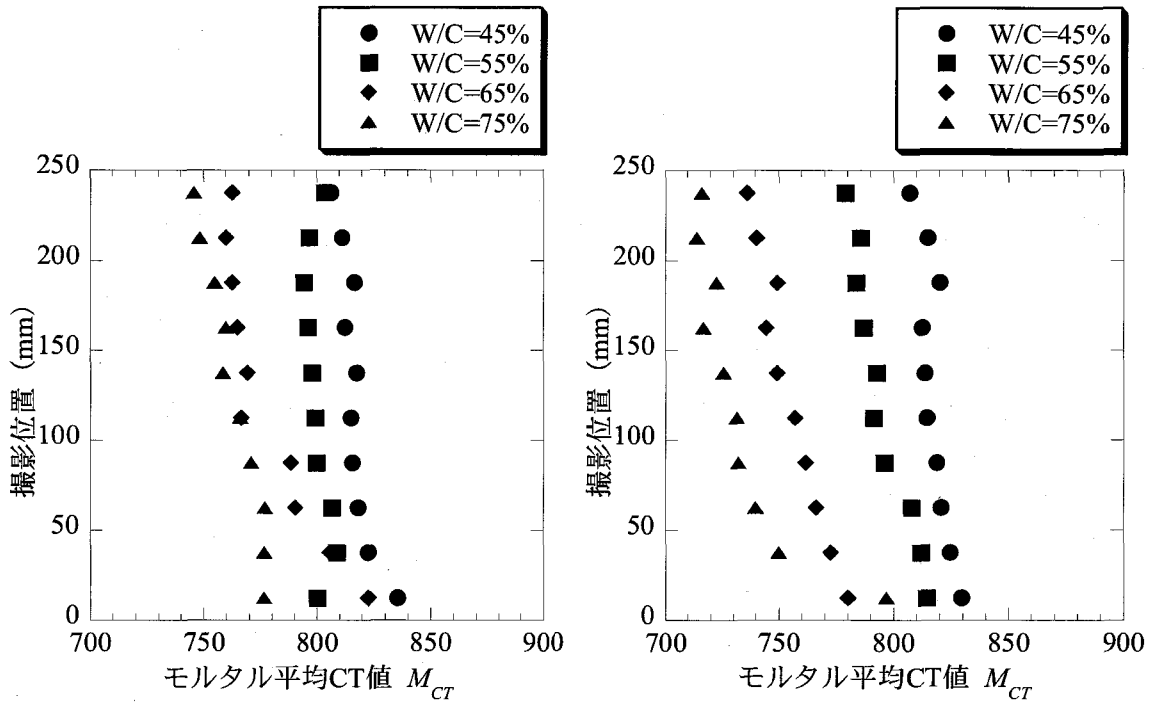
一方、B 供試体の W/C=75%の配合では、ばらつきが大きく、最下部のモルタル平均 CT 値が 824 に対し、上部から 3 番目の断面では 728、最上部では 799 という結果であった。また、C 供試体の W/C=55%でもばらつきが大きい。これらは、他の供試体よりもばらつきが大きく、供試体作製時の材料分離が影響を及ぼした可能性が考えられる。

2) モルタル供試体 (Gmax5mm)

図-5.7はA, B, Cの各モルタル (Gmax5mm) の各配合の供試体について、横軸を材料構成定量化法で求めたモルタル平均CT値、縦軸を撮影位置とし、その関係を示したものである。

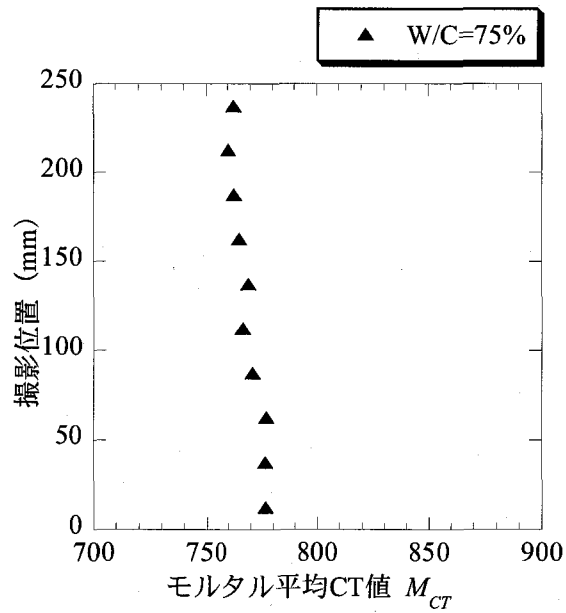
A 供試体については、Gmax40mmのコンクリートの分布状況と同様であり、水セメント比が小さい配合ほどモルタル平均CT値 M_{CT} が大きく、供試体の上部ほどモルタル平均CT値が小さい。供試体の上部ほどモルタル平均CT値が小さい理由は、Gmax40mmのコンクリートと同様に、供試体作製時に材料が分離した可能性や作製後の硬化過程においてブリーディングが生じた可能性が考えられる。B 供試体およびC 供試体についても同様に、水セメント比が小さい配合ほどモルタル平均CT値が大きく、供試体の上部ほどモルタルの平均CT値が小さい。また、B 供試体において顕著であるが、Gmax40mmのコンクリートと同様に、水セメント比が小さいと上下のモルタル平均CT値 M_{CT} の差は小さく、水セメント比が大きいと上下の M_{CT} の差は大きい。しかし、C 供試体ではほとんど一様に分布している。

また、Gmax40mmのコンクリート供試体でモルタル平均CT値のばらつきが顕著であったB 供試体のW/C=75%の配合では、最下部のモルタル平均CT値がやや大きいものの、供試体全体のばらつきはGmax40mmのコンクリートよりも小さい結果であった。他の配合についても、Gmax40mmよりも分布形状は滑らかであり、ばらつきは少ないといえる。



(a) A 供試体

(b) B 供試体



(c) C 供試体

図-5.7 モルタル平均 CT 値の鉛直分布 (Gmax5mm)

(2) 各供試体の水セメント比とモルタル平均 CT 値 $M_{CT}(mean)$

A, B, C の各供試体について、各断面のモルタル平均 CT 値 M_{CT} を平均した値を供試体のモルタル平均 CT 値 $M_{CT}(mean)$ と定義する。供試体は $\phi 125\text{mm}$ 、直径 250mm であり、 2.5cm 間隔の 10 断面の平均 CT 値 M_{CT} の平均が供試体のモルタル平均 CT 値 $M_{CT}(mean)$ となる。

A, B, C の各供試体の水セメント比と供試体のモルタル平均 CT 値 $M_{CT}(mean)$ の関係を図-5.8 に示す。粗骨材の最大寸法の影響を確認するために、各供試体は $G_{\text{max}40\text{mm}}$ のコンクリートと $G_{\text{max}5\text{mm}}$ のモルタルに分けてプロットしている。

A 供試体では水セメント比が大きくなると、供試体のモルタル平均 CT 値 $M_{CT}(mean)$ が小さくなる。水セメント比の大きいコンクリートやモルタルは、密度の小さい水の量、すなわち単位水量が大きいため、小さくなると考えられる。B 供試体および C 供試体についても同様に、水セメント比が大きい配合ほどモルタル平均 CT 値が小さくなっている。

B 供試体では、水セメント比が 65% の配合 B-3 と 75% の配合 B-4 について、 $G_{\text{max}40\text{mm}}$ のコンクリートと $G_{\text{max}5\text{mm}}$ のモルタルで供試体のモルタル平均 CT 値 $M_{CT}(mean)$ の評価が若干乖離している。この原因は不明であるが、 $G_{\text{max}40\text{mm}}$ の供試体の配合 B-3 (W/C=65%) および B-4 (W/C=75%) の各供試体における各撮影断面のモルタル平均 CT 値 M_{CT} の鉛直分布を示した図-5.6(b) では、供試体の鉛直方向の分布にはかなりのばらつきがあった。したがって、供試体を代表するモルタル平均 CT 値を精度よく評価するための撮影断面数が十分でなかったことが原因のひとつと考えられる。このため、供試体は一様に作製することや 1 本の供試体を代表するように撮影断面の位置や枚数を適切に設定することに留意する必要がある。

以上、図-5.8 に示したように、水セメント比が大きくなるとモルタル平均 CT 値が小さくなる傾向は細骨材の種類が異なっても同様であり、同じ材料を使用すれば水セメント比とモルタルの平均 CT 値は高い相関を示すことが明らかである。

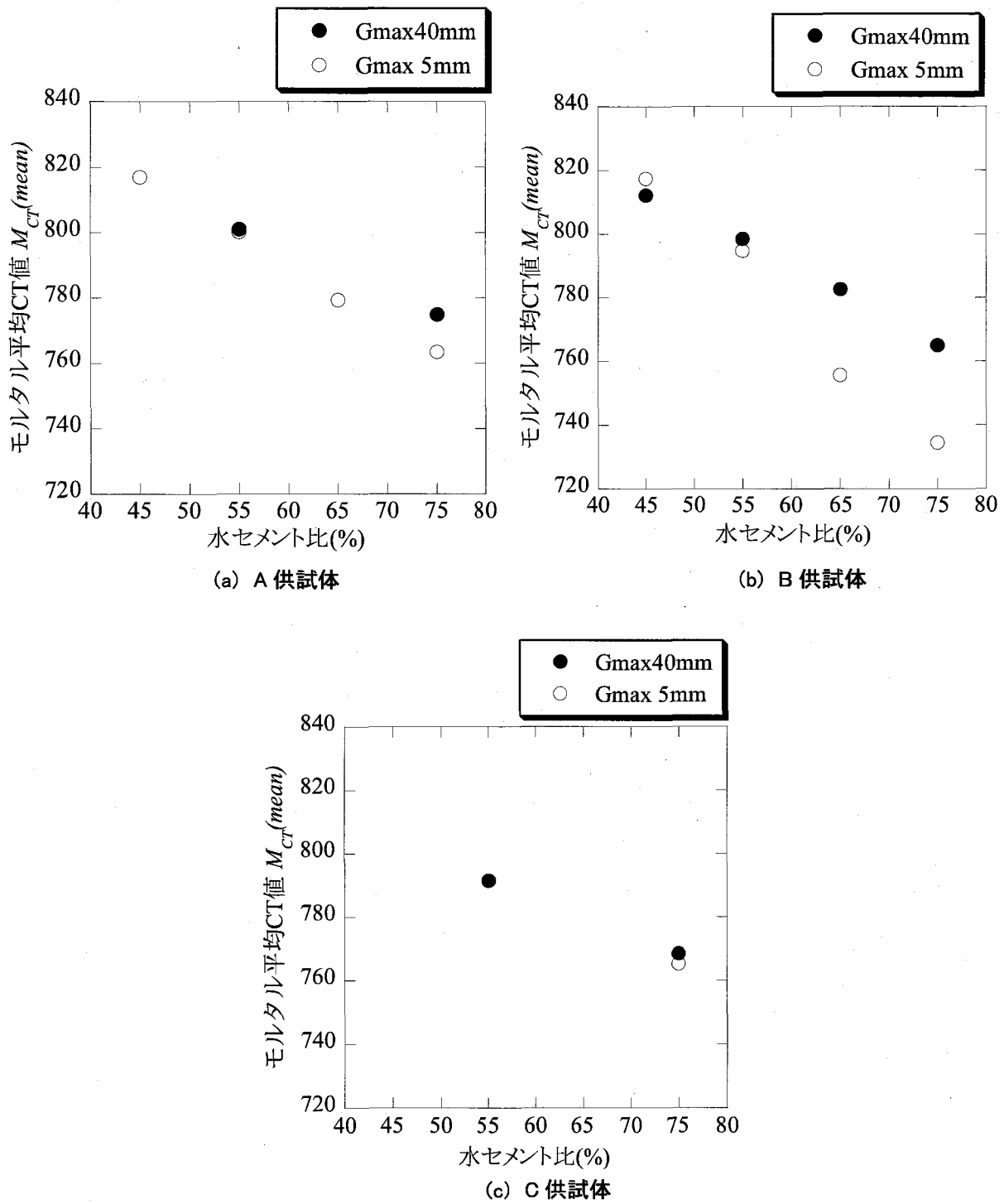


図-5.8 水セメント比とモルタル平均 CT 値

(3) 細骨材率とモルタル平均 CT 値 $M_{CT}(mean)$

次に、A 供試体について水セメント比を 55%と一定にし、細骨材率を 38%から 44%に変化させた配合の各コンクリート供試体における、細骨材率と供試体のモルタル平均 CT 値 $M_{CT}(mean)$ の関係を図-5.9 に示す。図中には各細骨材率の配合上の単位水量 W を示している。

同図より、細骨材率 38%、40%および 42%の供試体のモルタル平均 CT 値 $M_{CT}(mean)$ にはほとんど差がないが、細骨材率 44%の供試体は小さく評価されている。この原因は以下のように考えられる。骨材中の細骨材率が増加すると、一定のワーカビリティを得るために単位水量 W が増加する。すなわち、コンクリート供試体のモルタル部分の密度は骨材の増加により大きくなるとともに、単位水量の増加により小さくなるため、細骨材率の変動はモルタル平均 CT 値を大きくする要因にも、小さくする要因にもなり得る。

一方、本研究で設定したコンクリートの配合は細骨材率 40%を標準としており、この付近では細骨材率が変化してもモルタル平均 CT 値はほとんど変化しない。したがって、細骨材率が大きく異なるコンクリート供試体をモルタル平均 CT 値で評価する場合には十分な注意が必要である。

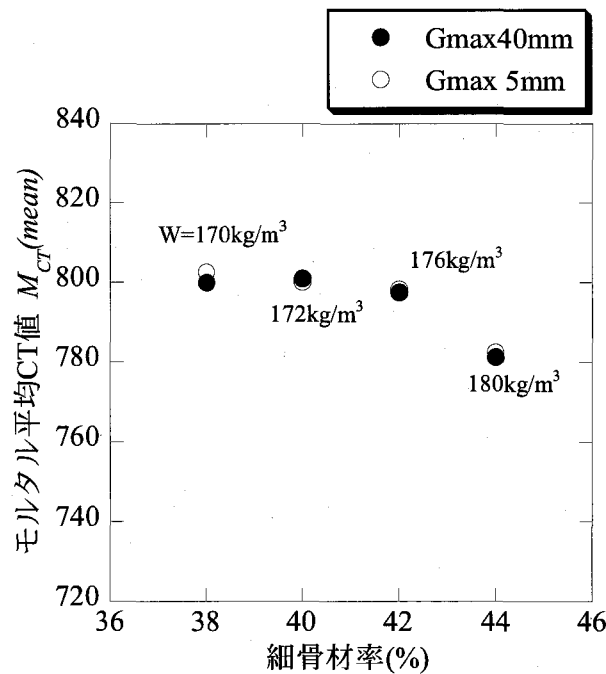


図-5.9 細骨材率とモルタル平均 CT 値

(4) 水セメント比とモルタル平均 CT 値 $M_{CT}(mean)$ の相関

A, B, C の各配合の供試体について、水セメント比と供試体のモルタル平均 CT 値 $M_{CT}(mean)$ の関係を図-5.10 に示す。図中には、各供試体について最小二乗法による近似線を示している。

B 供試体の水セメント比 65% の配合 B-3 および 75% の配合 B-4 について、Gmax40mm のコンクリートと Gmax5mm のモルタルとのモルタル平均 CT 値に乖離があるため、B 供試体の近似線は他の A, C 供試体とは若干異なる傾向を示している。しかし、相違はわずかであり、いずれも水セメント比の高いコンクリート供試体のモルタル平均 CT 値は小さく、水セメント比とモルタル平均 CT 値は高い相関を示した。したがって、本研究で用いた材料や配合の範囲、すなわち同じセメントや粗骨材を使用したコンクリートの配合を用いた場合には、コンクリート供試体の水セメント比とモルタル平均 CT 値との間には高い相関関係があるといえる。

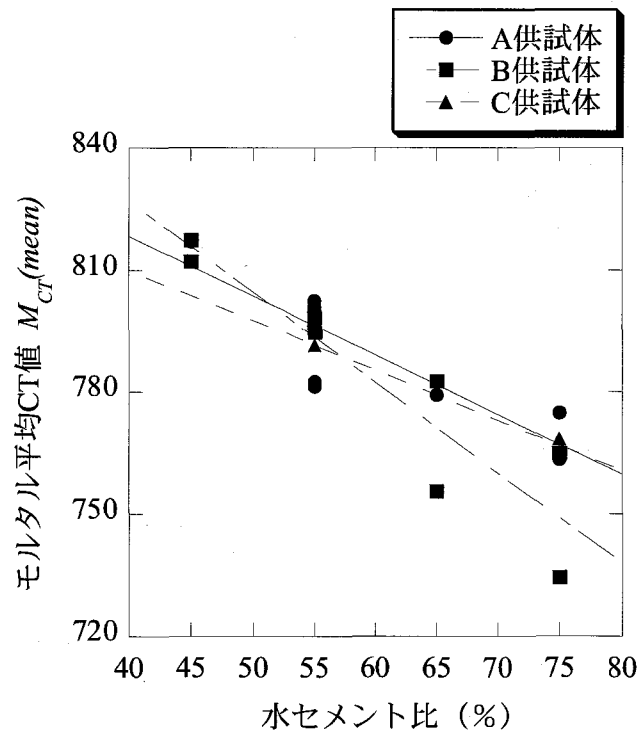


図-5.10 水セメント比とモルタル平均 CT 値(全データ)

(5) 粗骨材の最大寸法の影響

A, B, C の各配合の供試体における粗骨材の最大寸法が 40mm と 5mm の場合の供試体のモルタル平均 CT 値 $M_{CT} (mean)$ の関係を図-5.11 に示す。同図より、B 供試体の水セメント比 65% の配合 B-3 および 75% の配合 B-4 について、 $G_{max40mm}$ のコンクリートと G_{max5mm} のモルタルとのモルタル平均 CT 値に乖離があるが、他の配合については、粗骨材の最大寸法が 40mm と 5mm とで、モルタルの平均 CT 値はほぼ同じ値として評価された。粗骨材が 5mm のコンクリートは、40mm のコンクリートをウエットスクリーニングにより 5mm 以上の粗骨材を取り除いたものであることから、本研究で提案したしきい値の設定によって、抽出されたモルタル部はほぼ同じものであると考えられる。

前述したように、B 供試体では、供試体の鉛直方向の分布にはかなりのばらつきがあったことから、撮影断面が十分に多くなかったために供試体を代表するモルタル平均 CT 値の評価ができなかった可能性がある。

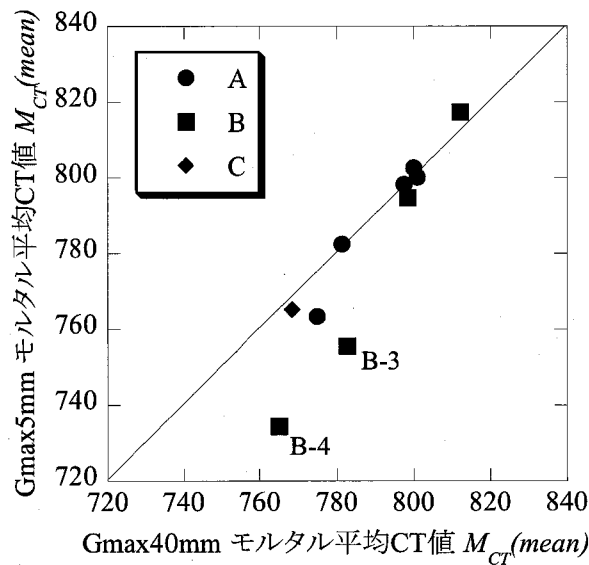


図-5.11 $G_{max40mm}$ と G_{max5mm} における $M_{CT}(mean)$ の比較

5. 2. 5 モルタル平均 CT 値と単位セメント量

モルタル平均 CT 値を評価する時、直径 1mm 程度以上の空隙（エントラップドエア）は除いている。したがって、水、セメント、エントレインドエアおよび粒径 1mm 程度以下の骨材がモルタル平均 CT 値として評価される。これらのうち、セメントの密度が最も大きいので CT 値に与える影響は大きいと考えられる。ここで、配合中の単位セメント量を C と定義する。

図-5.12 は A, B, C の各供試体のモルタル平均 CT 値 $M_{CT} (mean)$ と単位セメント量 C の関係を示したものである。図中には、各供試体について最小二乗法による近似線を示した。A, B, C の各供試体について、単位セメント量が大きいほどモルタル平均 CT 値が大きくなる関係が確認できる。すなわち、単位セメント量の多いコンクリートは、単位セメント量に比例してモルタル部の密度が高くなっている。また、この傾向は A, B, C の各供試体で同様であり、細骨材の種類の影響は小さいといえる。

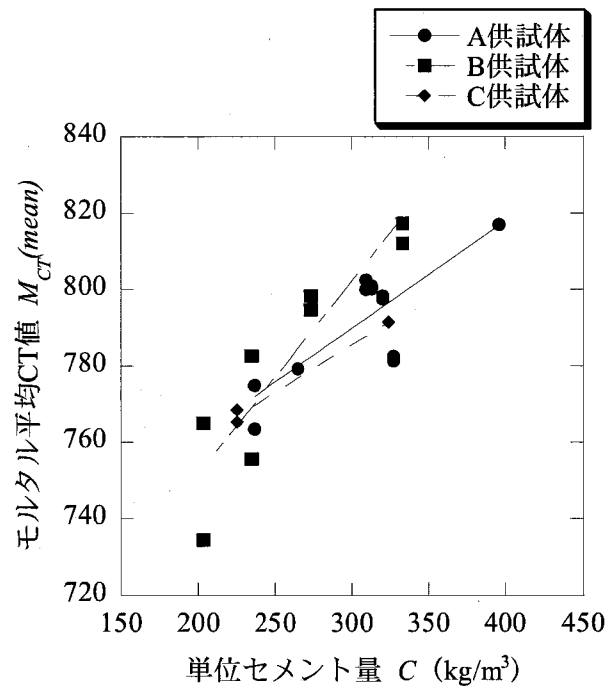


図-5.12 単位セメント量とモルタル平均 CT 値

5.2.6 コンクリートの配合推定

(1) 水セメント比と単位セメント量の推定近似式

これまでの検討から、同じ材料を使用している A, B, C の各供試体のモルタル平均 CT 値は水セメント比および単位セメント量と高い相関があることがわかった。

そこで、今回試験を実施した細骨材の種類や細骨材率の異なる供試体の全てのデータについて、モルタル平均 CT 値に対する水セメント比、モルタル平均 CT 値と単位セメント量の相関から、最小二乗法による推定近似式を求めた。

A, B, C の全ての供試体のモルタル平均 CT 値 $M_{CT}(mean)$ と水セメント比 W/C の関係を図-5.13 に、モルタル平均 CT 値 $M_{CT}(mean)$ と単位セメント量 C の関係を図-5.14 に示す。それぞれの図において、平均モルタル CT 値 $M_{CT}(mean)$ から水セメント比 W/C を求める推定近似式を (5.1) に、単位セメント量 C を求める推定近似式を (5.2) に示す。

$$W/C (\%) = -0.44 (\%) \cdot M_{CT} (mean) + 407 (\%) \quad (5.1)$$

$$C (\text{kg/m}^3) = 2.18 (\text{kg/m}^3) \cdot M_{CT} (mean) - 1440 (\text{kg/m}^3) \quad (5.2)$$

それぞれの式による相関係数 R は、モルタル平均 CT 値-水セメント比の関係で $R=0.88$ 、モルタル平均 CT 値-単位セメント量の関係で $R=0.83$ であった。

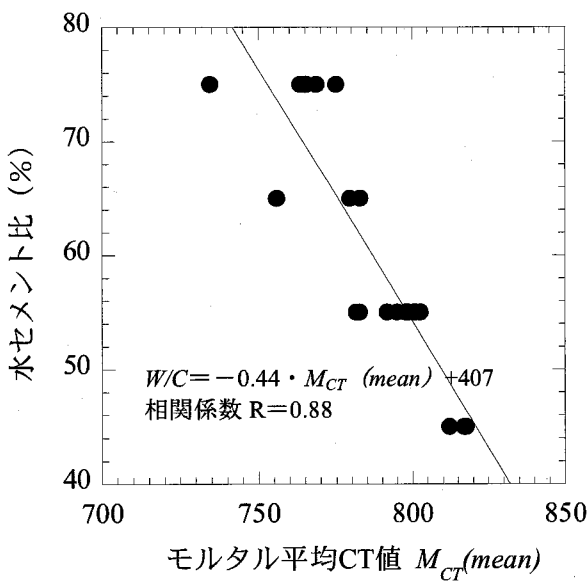


図-5.13 モルタル平均 CT 値と水セメント比

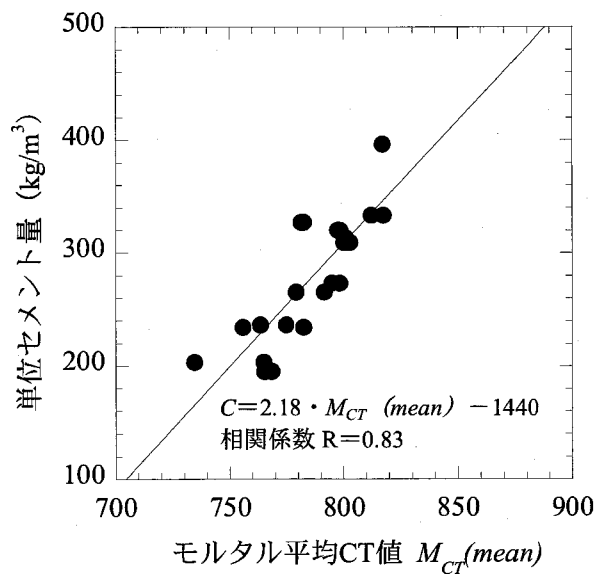


図-5.14 モルタル平均 CT 値と単位セメント量

(2) 実際の値と推定値の比較

モルタル平均 CT 値から水セメント比と単位セメント量を線形近似した式 (5.1) および (5.2) を用いて、水セメント比と単位水量を推定値として算出し、実際の値と比較を行った。

推定した水セメント比と実際の水セメント比の関係を図-5.15 に、推定した単位セメント量と実際の単位セメント量の関係を図-5.16 に示す。また、推定した水セメント比と単位セメント量から算出した単位水量を推定値として、実際の単位水量と比較したものを図-5.17 に示す。

配合推定にあたっては、水セメント比推定の従来法である「セメント協会法」²⁾による化学分析手法との比較も行った。「セメント協会法」による配合推定は、水セメント比が 45% の配合 A-1 および水セメント比が 65% の配合 A-6 のコンクリート供試体について実施した。「セメント協会法」による推定結果の一覧を表-5.4 に示す。また、図-5.15~5.17 には「セメント協会法」推定した水セメント比、単位セメント量および単位水量を白抜きの点で示している。

まず、実際のセメント比と推定セメント比の関係である図-5.15 を見る。図中には、5% 乖離した線を 2 本の点線で示している。ほとんどのプロットが 5% の誤差の範囲内にあり、精度よく評価できたといえる。セメント協会法による評価でも W/C=45% の供試体で 5% の乖離、W/C=65% の供試体で 6% の乖離であり、同程度以上の精度であるといえる。

次に、実際の単位セメント量と推定単位セメント量の関係である図-5.16 を見る。図中には 50kg/m³ 乖離した線を 2 本の点線で示している。ほとんどのプロットが 50kg/m³ の誤差の範囲内にあり、精度よく評価されていることがわかる。セメント協会法による評価でも W/C=45% の供試体で 18kg/m³ の乖離、W/C=65% の供試体で 50kg/m³ の乖離であり、同程度の精度はあるといえる。

最後に、実際の単位水量と推定単位水量の関係である図-5.17 を見る。図中には 30kg/m³ 乖離した線を 2 本の点線で示している。1 点を除くすべてのプロットが 30kg/m³ の誤差の範囲内にあり、高精度で評価された。セメント協会法による評価では、W/C=45% の供試体で 23kg/m³ の乖離、W/C=65% の供試体で 42kg/m³ の乖離であり、精度は X 線 CT 法よりも低い。

表-5.4 セメント協会法による配合推定結果 (C 供試体)

		W/C=45%	W/C=65%
表乾密度	g/cm ³	2361	2337
絶乾密度	g/cm ³	2251	2207
吸水率	%	4.89	5.89
CaO含有率	%	13.5	9.5
単位水量	kg/m ³	123 (146)	104 (146)
単位セメント量	kg/m ³	306 (324)	175 (225)
水セメント比	%	40 (45)	59 (65)

() 内は実際の値を示す。

以上、室内作製コンクリートで使用した材料や配合の範囲では、X線CT法を用い、モルタル平均CT値から水セメント比と単位セメント量を従来の配合推定方法と同程度以上の精度で推定できることが明らかとなった。

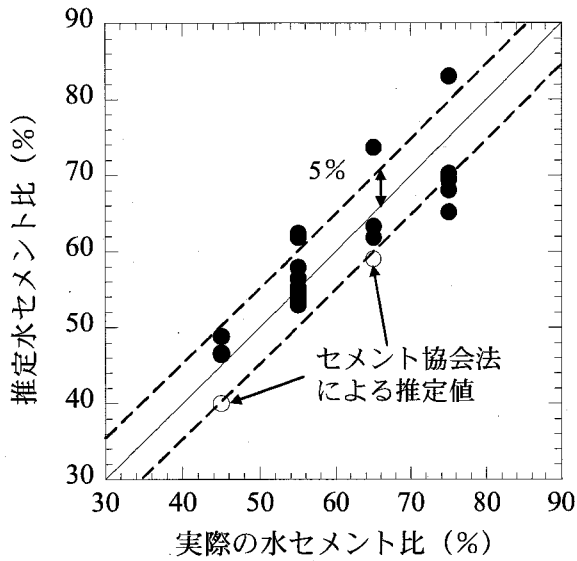


図-5.15 水セメント比の比較

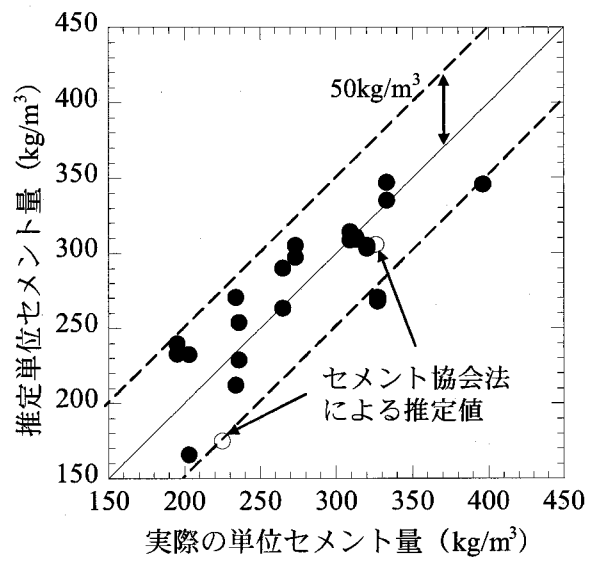


図-5.16 単位セメント量の比較

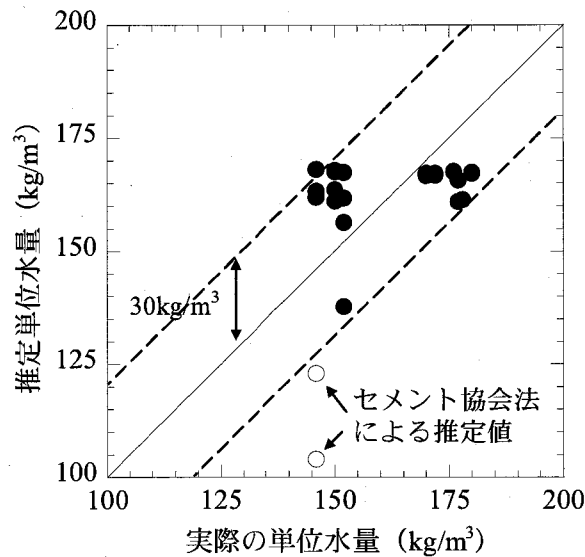


図-5.17 単位水量の比較

5. 2. 7 モルタル平均 CT 値と圧縮強度

(1) 材齢, 水セメント比と圧縮強度の関係

A, B, C の各コンクリート供試体 (Gmax40mm) について, 材齢 7 日と材齢 28 日および材齢 7 年でコンクリートの圧縮強度試験 (JIS A 1108) を実施した。

A, B, C の各供試体別の材齢と圧縮強度および水セメント比と圧縮強度の試験結果を図-5. 18 に示す。各コンクリート供試体について, 材齢 28 日と材齢 7 年での圧縮強度はほぼ同じである。むしろ, 一部の供試体では材齢 7 年の圧縮強度が材齢 28 日の圧縮強度よりも小さくなっているものもある。一般的にはコンクリートの材齢は 28 日以降も増加をするが, 本試験においては, 材齢 28 日まで水中養生を実施し, その後は気中での養生となったため, 28 日以降の強度の増進はほとんどなかったと考えられる。

各コンクリート供試体の水セメント比と圧縮強度については, 水セメント比が大きくなるとともに, 圧縮強度が小さくなる相関が認められる。また, A, B, C の配合による相違はなく, 同様の傾向を示した。

(2) 水セメント比と材齢 28 日圧縮強度の関係

コンクリートの圧縮強度を F , 水セメント比を W/C , 水セメント比の逆数であるセメント水比を C/W と定義すると, 良質の骨材を用い, ワーカービリティの良いコンクリートを十分に締め固めたコンクリートでは, セメント水比 C/W と圧縮強度 F との間に, 比例関係⁸⁾ があることが知られている。この関係は, 一般に式 (5.3) で表され, コンクリートの配合を設計する際には, この式から必要な圧縮強度に対するセメント水比を求め, 逆数である水セメント比を得る。

$$F \text{ (N/mm}^2\text{)} = A \text{ (N/mm}^2\text{)} \cdot C/W + B \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (5.3)$$

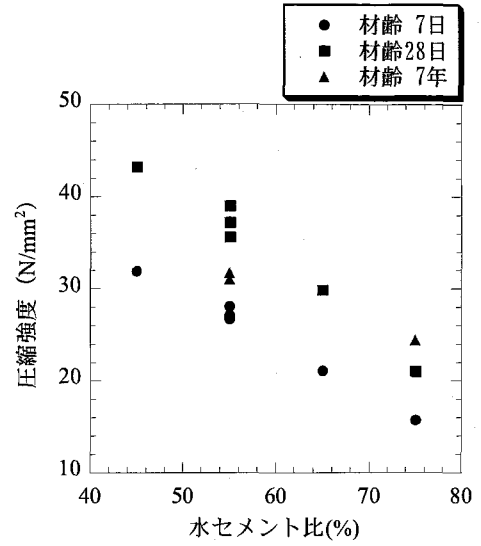
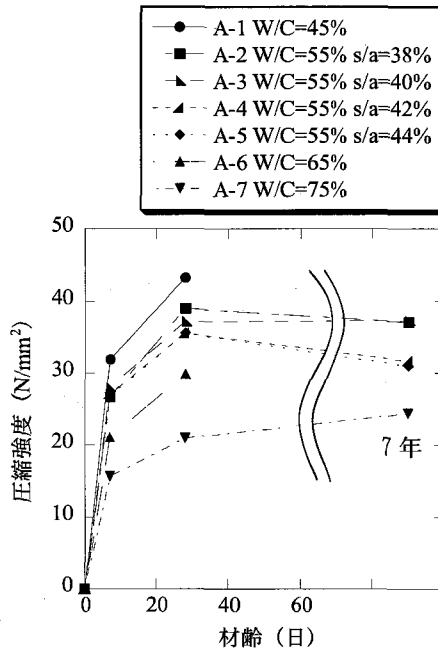
ここに, A, B は材料, 配合条件, 養生方法, 材齢によって決まる定数である。

圧縮強度を材齢 28 日で代表して材齢 28 日の圧縮強度を F_{28} とし, A, B, C の各コンクリート供試体 (Gmax40mm) の水セメント比 W/C と圧縮強度 F_{28} の関係を図-5. 19 に, セメント水比 C/W と圧縮強度 F_{28} の関係を図-5. 20 に示す。図より水セメント比が小さくなると圧縮強度は小さくなり, セメント水比が大きくなると圧縮強度が大きくなる相関が確認できる。

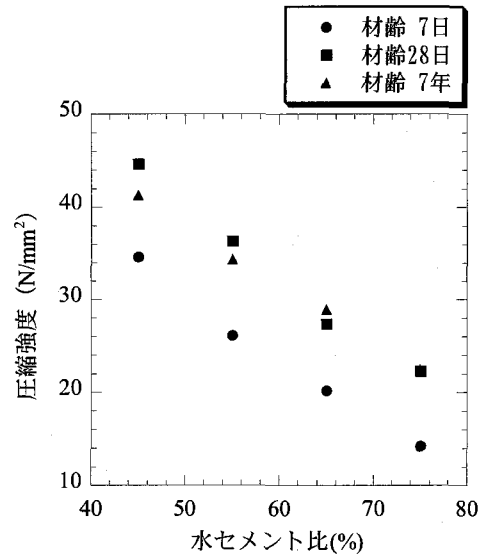
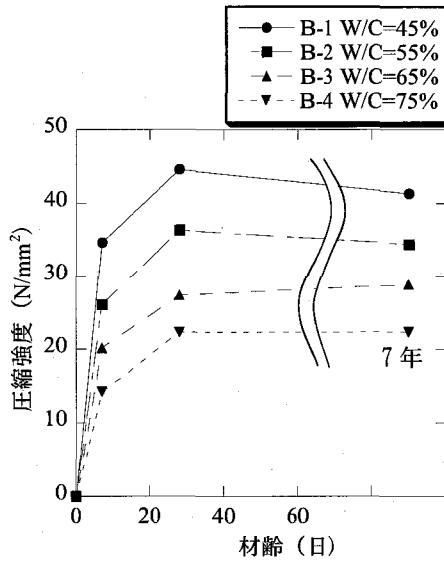
次に, 図-5. 20 から式 (5.3) を用いてセメント水比 C/W と圧縮強度 F_{28} の関係を最小二乗法で近似した結果を式 (5.4) に示す。

$$F_{28} \text{ (N/mm}^2\text{)} = 23 \text{ (N/mm}^2\text{)} \cdot C/W - 6.8 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (5.4)$$

(a) 供試体



(b) 供試体



(c) 供試体

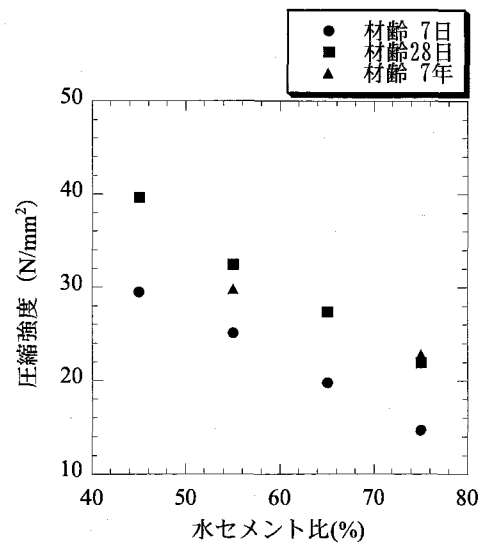
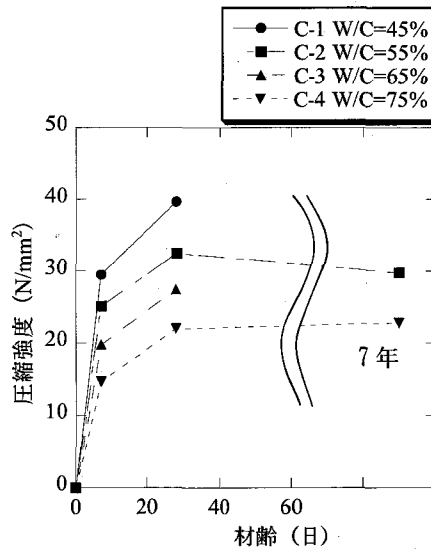


図-5.18 配合別の材齢、水セメント比と圧縮強度

一方、水セメント水比 W/C と圧縮強度 F_{28} の関係は、水セメント比がセメント水比の逆数であることから、反比例の式で表すことができると考えられるが、図-5.19 で示されている範囲では線形で近似が可能であり、セメント水比と同様に最小二乗法で線形近似を行う。得られた水セメント水比 W/C と圧縮強度 F_{28} の近似式を (5.5) に示す。

$$F_{28} \text{ (N/mm}^2\text{)} = -0.70 \text{ (N/mm}^2 \cdot \%^{-1}\text{)} \cdot W/C \text{ (\%)} + 74.3 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (5.5)$$

以上、圧縮強度を水セメント比やセメント水比で線形近似を行った結果を示したが、それぞれの相関係数 R は 0.96, 0.97 と高い相関であった。

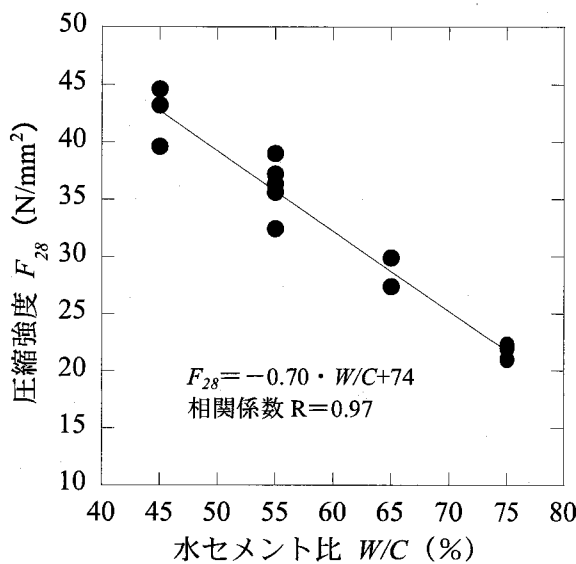


図-5.19 水セメント比と圧縮強度
材齢 28 日 (全データ)

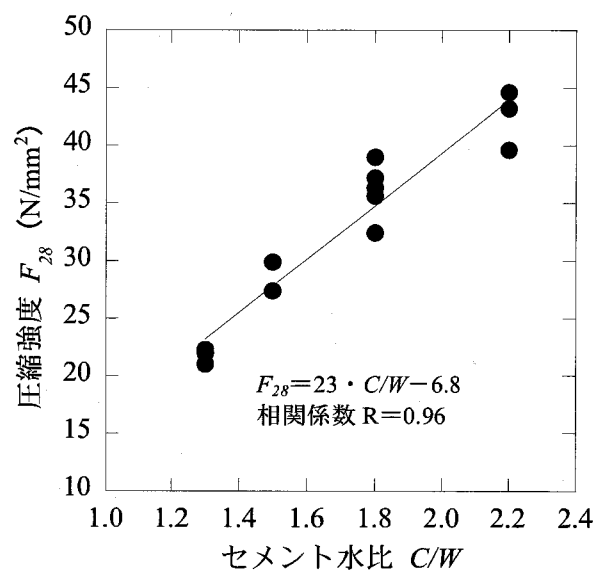
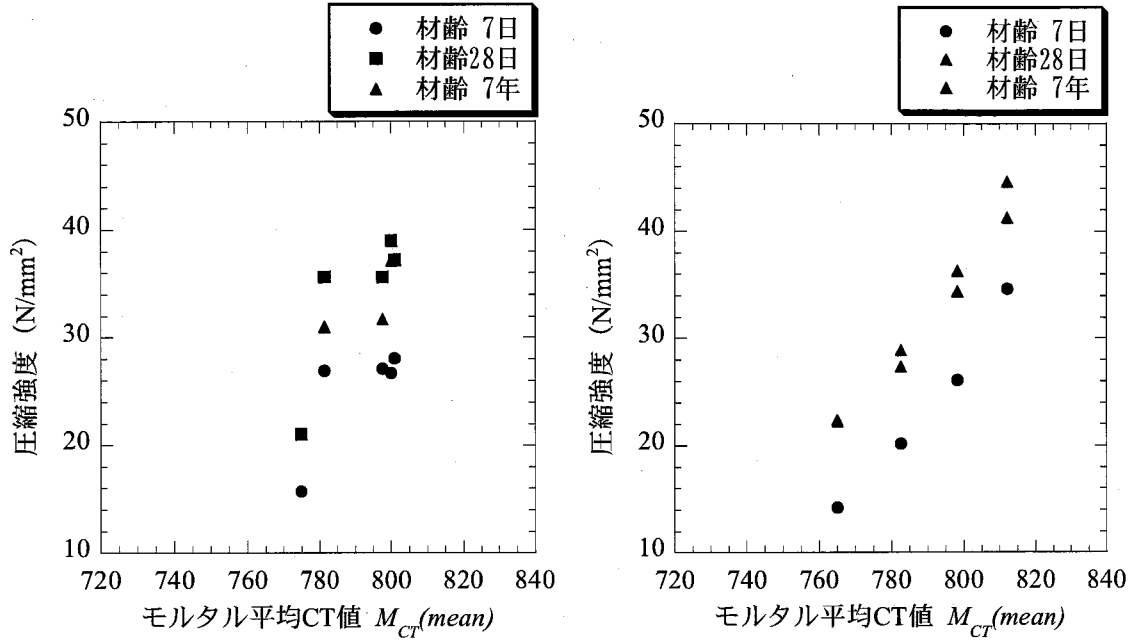


図-5.20 セメント水比と圧縮強度
材齢 28 日 (全データ)

(3) モルタル平均 CT 値と圧縮強度の関係

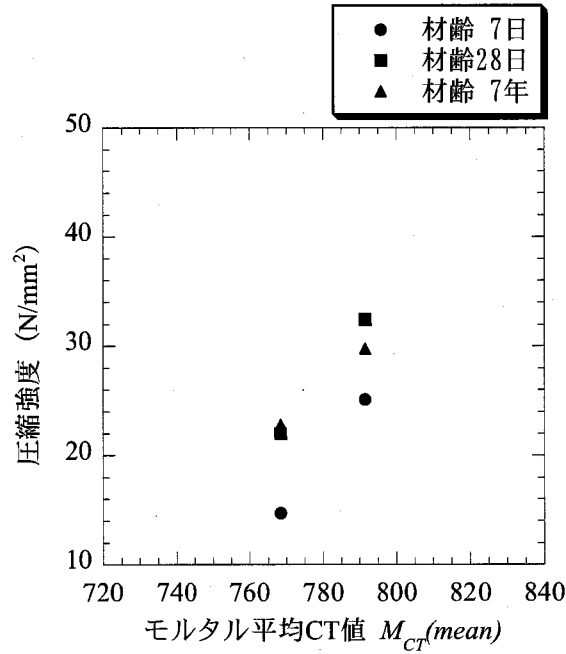
水セメント比 W/C とモルタル平均 CT 値 M_{CT} (mean) および水セメント比 W/C と圧縮強度 F には高い相関があるのでモルタル平均 CT 値と圧縮強度にも相関があると考えられる。そこで、A, B, C の各供試体における、供試体のモルタル平均 CT 値 M_{CT} (mean) と材齢 7 日、材齢 28 日および材齢 7 年の圧縮強度の関係を図-5.21 に示す。

各コンクリート供試体のモルタル平均 CT 値と圧縮強度については、A 供試体ではばらつきが見られるものの、モルタル平均 CT 値が大きくなると圧縮強度は大きくなる相関が認められる。また、A, B, C の配合による相違はなく、同様の傾向を示した。



(a) A 供試体

(b) B 供試体



(c) C 供試体

図-5.21 モルタル平均 CT 値と圧縮強度

次に、コンクリート供試体の全てのデータについてモルタル平均 CT 値 M_{CT} (mean) と材齢 28 日の圧縮強度 F_{28} の関係を図-5.22 に示す。モルタル平均 CT 値が高いほど圧縮強度が大きいことがわかる。そこで、最小二乗法を用いて線形近似を行った。得られたモルタル平均 CT 値による圧縮強度 F_{28} の推定近似式を (5.6) に示す。

$$F_{28} \text{ (N/mm}^2\text{)} = 0.49 \text{ (N/mm}^2\text{)} \cdot M_{CT} \text{ (mean)} - 352 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (5.6)$$

式 (5.6) によるモルタル平均 CT 値と圧縮強度の相関係数は $R=0.93$ と高い相関を示している。したがって、モルタル平均 CT 値と圧縮強度の関係は、水セメント比とモルタル平均 CT 値および水セメント比と圧縮強度と同様に高い相関関係にあるといえる。

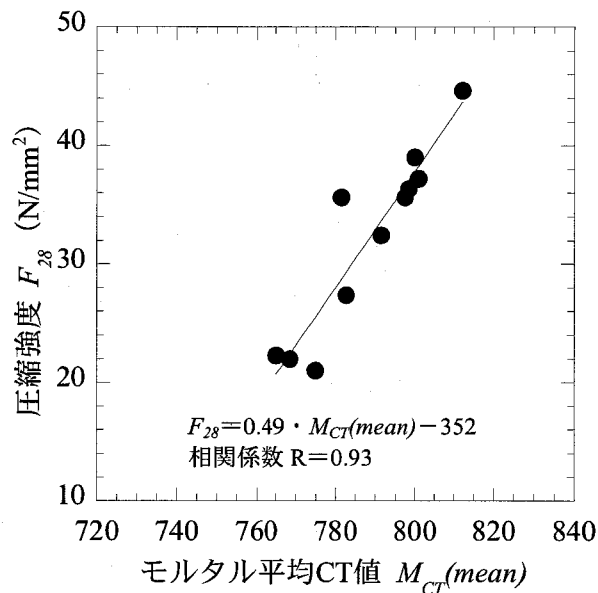


図-5.22 モルタル平均 CT 値と圧縮強度
材齢 28 日 (全データ)

5. 2. 8 供試体寸法の影響

第3章では、X線CT法をコンクリート供試体に適用するための基礎試験において、直径の異なるコンクリートの円柱供試体を用いて、供試体の直径と供試体断面の平均CT値の関係を検討した。そして、供試体断面の平均CT値は撮影する供試体寸法に影響し、供試体の直径が大きいほど平均CT値は小さくなることが明らかとなった。このことは、本章で得られた平均モルタルCT値と水セメント比、単位セメント量の関係が直径125mmの供試体だけに適用可能なことを示しており、異なる直径の供試体に適用するには、供試体の直径とモルタル平均CT値の関係を把握し、供試体の寸法毎にCT値を修正する必要がある。

そこで、表-5.2に示す配合のうち、C細骨材を用いた、水セメント比45%と65%の供試体である配合C-1およびC-3の供試体を図-5.23に示すように高さ100mmに切断し、125mm、100mm、83.6mm、58.7mm、34.5mmに順次削孔しながらX線CT撮影を行い、材料構成定量化法によりモルタル平均CT値を求めた。

図-5.24に直径とモルタル平均CT値の関係を示す。水セメント比が異なっても、モルタル平均CT値と直径には線形関係があり、供試体の直径 D (mm)が小さくなるとモルタル平均CT値 $M_{CT} (mean)$ も小さくなるのがわかる。また、その傾きはほぼ等しい。図中の実線は全てのデータの最小二乗法による近似線である。近似式は以下の式(5.7)に示す。

$$M_{CT} (mean) = -4.66 (\text{mm}^{-1}) \cdot D (\text{mm}) + 1380 \quad (5.7)$$

近似式(5.7)の相関係数 R は0.98と高い相関を示す。本近似式を用いれば、水セメント比に関わらず、求めたい直径のモルタル平均CT値に相当する値に修正することが可能となる。

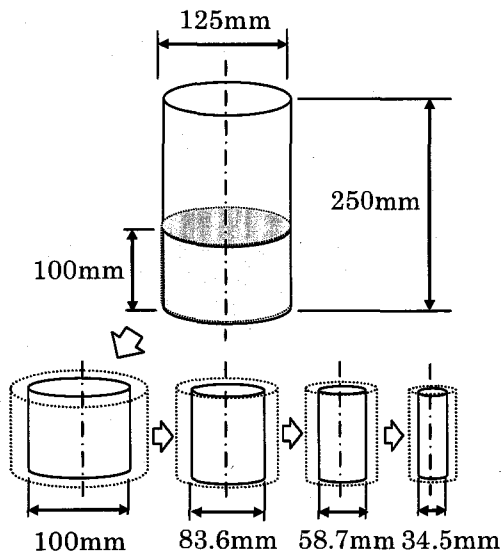


図-5.23 モルタル供試体の作製方法

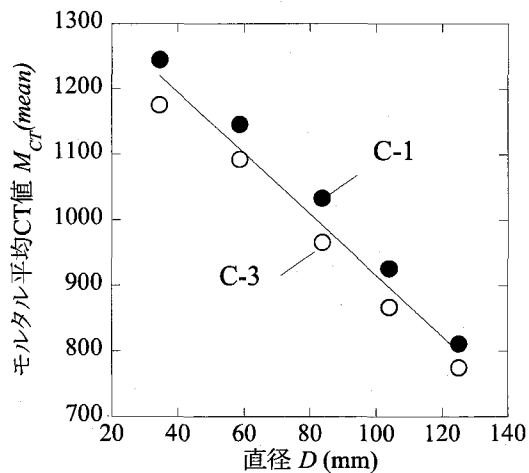


図-5.24 直径とモルタル平均CT値

5. 2. 9 粒度分布の解析

A, B, C の細骨材を用い、水セメント比 55% のコンクリート供試体の 1.2mm 以下の骨材を除いた推定粒度分布曲線を図-5. 25 に示す。黒の点線は BS 882 (1992) によるコンクリート用骨材の標準的な粒度分布⁹⁾ の上限と下限、黒の実線は骨材の粒度分布試験結果から細骨材率を 40% の配合としたときの計算で求めた配合の実際の粒度分布である。赤い実線は、X 線 CT 法を用いて推定した粒度分布である。A, B, C の各供試体のいずれも粒度の細かい方から粒径 15mm 程度までの粒度分布はほぼ正確に評価できていることがわかる。粒径 15mm 以上では徐々に値が大きくなり評価されている。これは、X 線 CT 法で評価する断面が 3 次元の物体を代表する 2 次元断面であり、3 次元での実際の物体の寸法とは異なることが原因と考えられる。

なお、粒度分布の解析方法は第 4 章第 8 節を参照されたい。

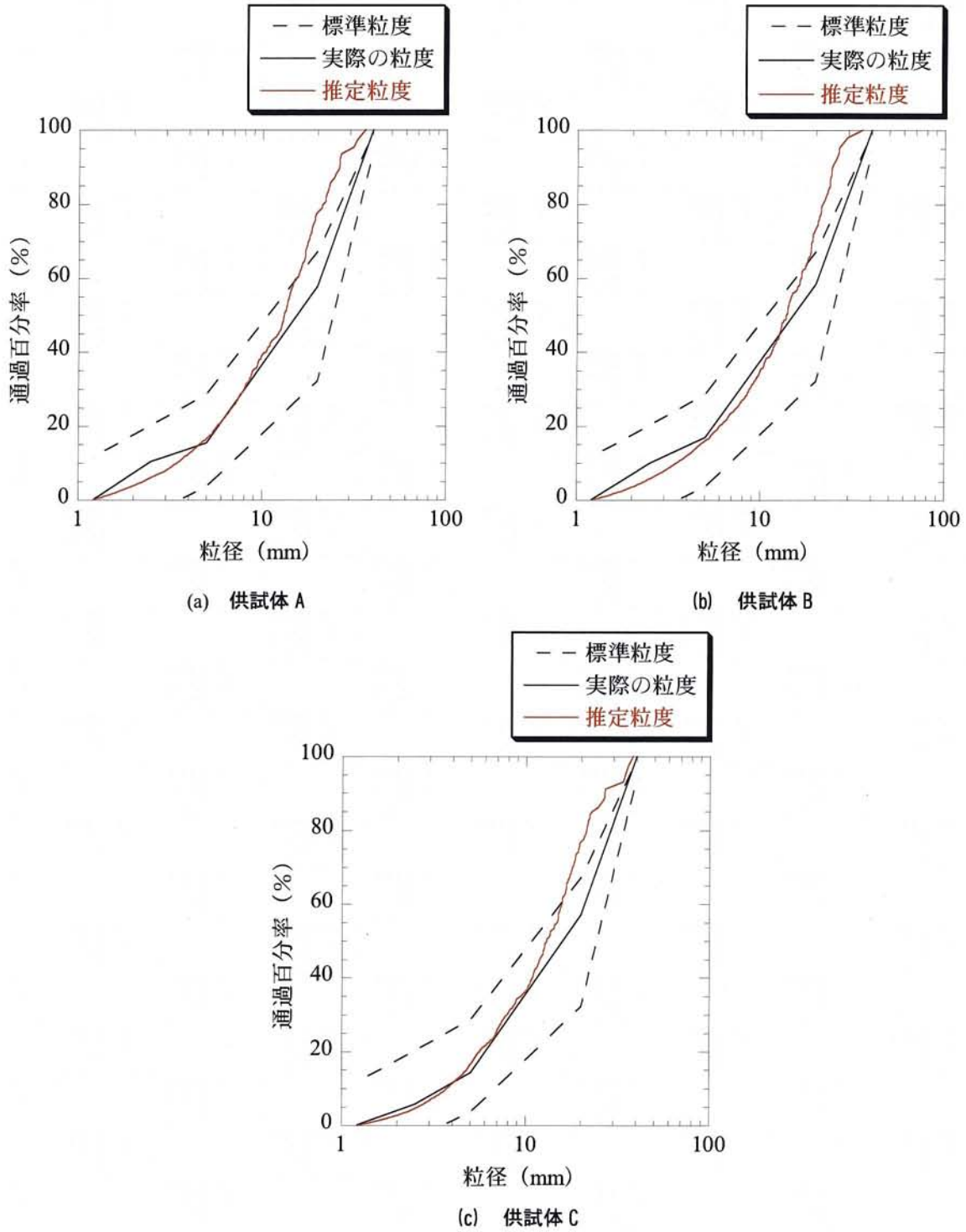


図-5.25 粒度分布

5. 3 工場生産コンクリートへの適用

5. 3. 1 試験方法

生コン工場で生産され、建設現場で使用されているコンクリートに本研究の材料構成定量化法を適用し、分析を行った。供試体は全部で6種類あり、一般的な鉄筋コンクリート構造物である設計基準強度 24N/mm^2 のコンクリート、設計強度 40N/mm^2 の高強度コンクリート、置換えコンクリートなどであり、市場に流通しているコンクリートである。使用しているセメントの種類は、普通ポルトランドセメント、早強セメント、高炉セメントB種の3種類のセメントを使用している。さらに各供試体で粒径や密度の異なる細骨材、粗骨材を各1~3種類用いている。使用材料の概要を表-5.5に示す。A供試体とB供試体では使用している粗骨材の密度が高い。特にB供試体の粗骨材は表乾密度で 3.0g/cm^3 と特殊な骨材を用いている。

コンクリート供試体の配合を表-5.6に示す。骨材の最大寸法はD供試体が25mm、G供試体が40mmであり、残りのA、B、C、E、F供試体は20mmである。配合は、水セメント比、細骨材率などについてそれぞれ異なる配合で作製されている。

コンクリートの形状は、G供試体のみが直径125mm、高さ250mmであり、残りは直径100mm、高さ200mmの円柱供試体である。撮影は、G供試体のみ25mm間隔で10断面行い、残りは20mm間隔で10断面ずつ撮影を行った。

X線CT撮影は室内作製の供試体と同様に、24時間乾燥炉に入れて 110°C の温度で十分に乾燥させ、その後密閉容器に乾燥剤と共に入れて12時間自然冷却させた後に実施した。

表-5.5 使用材料

供試体	セメントの種類	骨材の大きさ						密度 (g/cm^3)								
		細骨材 (mm)			粗骨材 (mm)			セメント	細骨材 (表乾)			粗骨材 (表乾)				
		①	②	③	①	②	③		①	②	③	①	②	③		
A	N	2.5-	5-	-	20-15	10-5	-	3.16	2.53	2.96	-	2.91	2.90	-		
B	N	5-	5-	-	20-5	-	-	3.16	2.56	2.58	-	3.00	-	-		
C	N	5-	2.5-	2.5-	20-5	20-5	-	3.16	2.64	2.56	2.56	2.74	2.74	-		
D	H	2.5-	1.2-	-	25-5	-	-	3.14	2.61	2.55	-	2.66	-	-		
E	N	2.2-2.6	2.6-3.0	-	20-5	-	-	3.16	2.56	2.56	-	2.85	-	-		
F	H	5-	2.5-	2.5-	20-5	20-5	-	3.14	2.64	2.56	2.56	2.74	2.74	-		
G	BB	2.5-	5-	-	40-20	15-5	20-15	3.04	2.60	2.67	-	3.06	2.85	2.85		

(N: 普通ポルトランドセメント, H: 早強セメント, BB: 高炉B種セメント)

表-5.6 コンクリート供試体の配合

供試体	粗骨材 の最大 寸法	目標 スラン プ	水セ メント 比	目標 空気 量	細骨 材率	単位量 (kg/m ³)									
						水	セメント	細骨材			粗骨材			混和剤	
								①	②	③	①	②	③	A1	A2
								<i>W</i>	<i>C</i>	<i>S</i>	<i>S</i>	<i>S</i>	<i>G1</i>	<i>G2</i>	<i>G3</i>
A	20	8	54.2	4.5	44.9	164	303	554	276	-	559	554	-	3.03	-
B	20	8	54.5	4.5	48.1	166	305	427	430	-	1080	-	-	3.05	-
C	20	8	55.0	4.5	49.1	162	295	454	176	264	488	488	-	2.95	-
D	25	12	36.0	4.5	39.9	157	436	340	340	-	1053	-	-	3.49	-
E	20	12	38.7	4.5	41.8	168	434	348	348	-	1077	-	-	3.91	-
F	20	12	38.2	4.5	46.6	166	435	400	155	233	475	475	-	3.26	-
G	40	12	72.1	4.5	47.1	162	225	617	272	-	465	379	271	2.25	1.13

5.3.2 供試体のX線CT画像

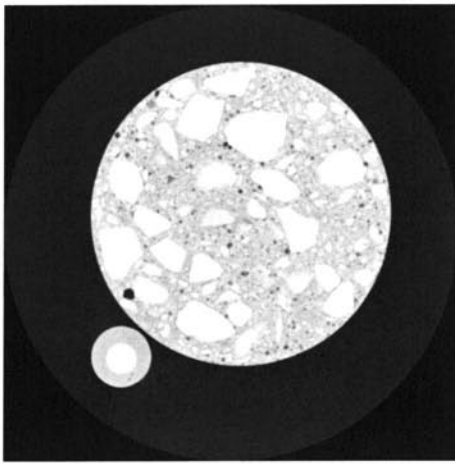
各供試体の中間付近で撮影したX線CT画像の例を図-5.26に示す。また、全画像を付録-3(巻末資料)に示す。使用材料や配合が異なるさまざまなコンクリート供試体であるが、全ての供試体について骨材、モルタル、空隙が判別可能であり、撮影画像の目視診断では、供試体毎の特徴的な相違は見られない。



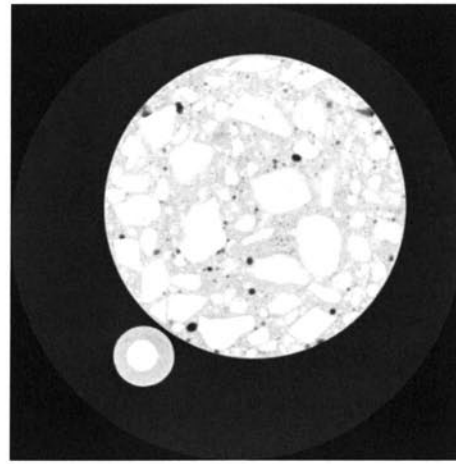
A 供試体

B 供試体

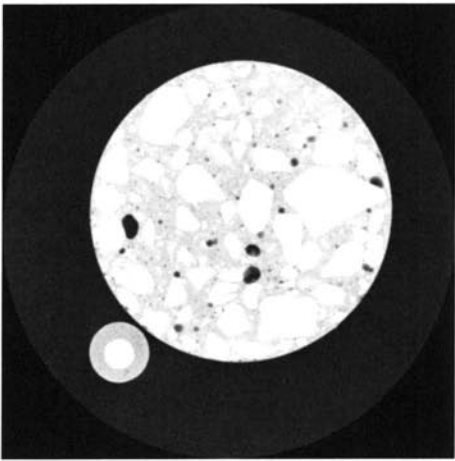
図-5.26 供試体のX線CT画像(次ページへつづく)



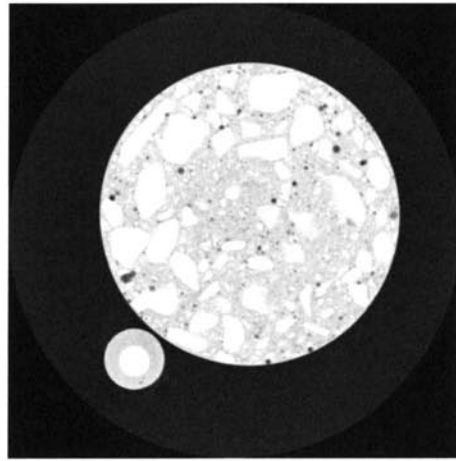
C 供試体



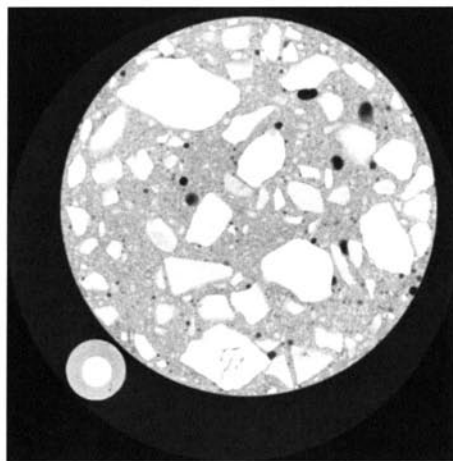
D 供試体



E 供試体



F 供試体



G 供試体

図-5.26 供試体の X 線 CT 画像

5. 3. 3 空隙率の解析

図-5.27 は各コンクリート供試体について、横軸を材料構成定量化法で求めた空隙率 Pr 、縦軸を撮影位置とし、その関係を示したものである。縦軸の 0mm は供試体の最下部、200mm は A~F 供試体の最上部、250mm は G 供試体の最上部を表す。

各供試体の空隙率 Pr について、大部分の供試体断面の空隙率が 0% から 3% 程度の範囲にある。A 供試体の上部と G 供試体の全域では空隙率が 3% から 6% とやや大きい傾向であるが、供試体の鉛直方向にはほぼ一様に分布しているといえる。

次に、各供試体について各断面の空隙率 Pr を平均した値である供試体の空隙率 Pr (mean) を表-5.7 に示す。配合上の空気量はすべての供試体について 4.5% であるのに対し、X線 CT 法で求めた空隙率 Pr (mean) は A~F 供試体で 1.0%~2.7%、G 供試体で 4.0% と小さく評価されていることがわかる。コンクリートの空隙は通常の場合、空気（エントレインドエア）連行剤を用いたコンクリートで 4~5%、そうでない場合には 2% 程度であり³⁾、X線 CT による空気量の測定では、粒径 1mm 以上のエントラップドエアが測定可能⁴⁾ とされている。したがって、X線 CT 法による空隙率はエントラップドエアを主として評価していると考えられる。

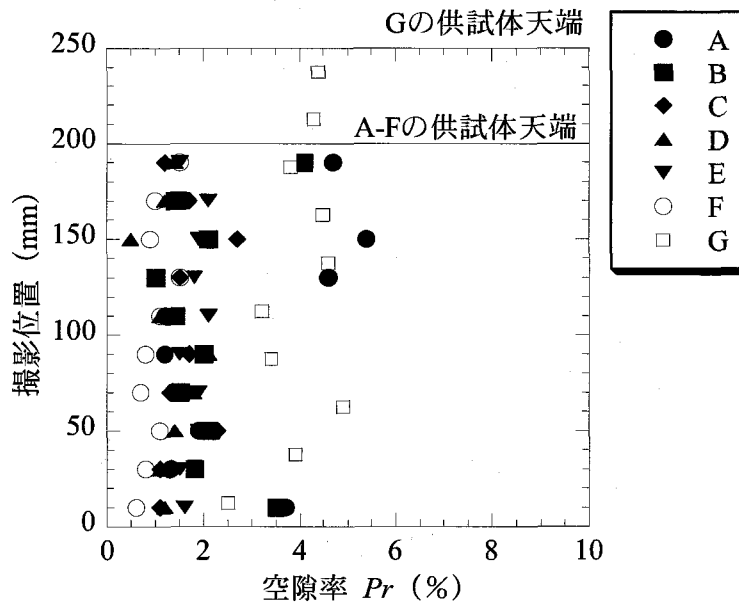


図-5.27 空隙面積率の鉛直分布

表-5.7 X線CT法による空隙面積率

供試体	空隙率 $Gr(\text{mean})$ (%)
A	2.7
B	2.1
C	1.6
D	1.3
E	1.8
F	1.0
G	4.0

5. 3. 4 骨材率の解析

図-5.28 は、材料構成定量化法で求めた骨材率 Gr と撮影位置の関係を示したものである。撮影位置の 0mm は供試体の最下部、200mm は A~F 供試体の最上部、250mm は G 供試体の最上部を表す。各供試体の骨材率 Gr について、最下部では全ての供試体断面の骨材率が 40% から 60% の範囲にあり、供試体中間部にかけて骨材率がやや小さくなっている。供試体の中間部から上部では骨材率が供試体によってばらつき、最上部での分布は 20% から 60% の範囲にある。特に、A 供試体と E 供試体は上部で骨材率が小さい傾向であり、この 2 本の供試体については供試体作製時の材料分離により、上部の粗骨材が下部に沈降した可能性が考えられる。

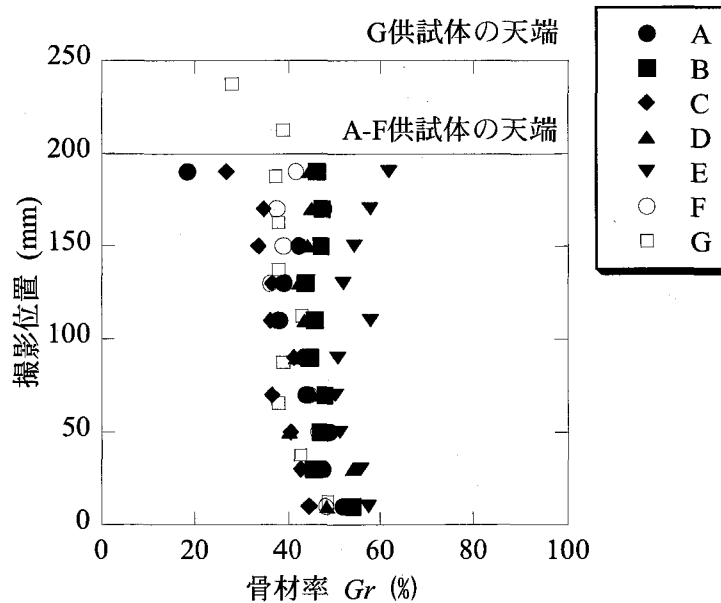


図-5.28 骨材率の鉛直分布

次に、各断面の骨材率 Gr を平均した値である供試体の骨材率 Gr (mean) と理論骨材率の関係を図-5.29 に示す。理論骨材率は、コンクリート供試体全体のかさ容積に対する配合上の粗骨材の容積の比率とした。

図-5.29 より、供試体の骨材率 Gr (mean) は理論骨材率よりも大きく評価されていることがわかる。供試体 E については X 線 CT 法による骨材率が大きく乖離しており、供試体の作製時に粗骨材が多く混入した可能性も考えられる。供試体 E を除く骨材率 Gr (mean) の平均値は 42.1%、理論骨材率の平均値は 37.0% であり、その差は 5.1% であった。理論骨材率の計算では粒径 5mm 以上の粗骨材を対象としているのに対し、X 線 CT 法では粒径 1mm 程度以上の骨材を評価していることが原因のひとつと考えられる。また、室内作製コンクリートで使用した粗骨材の密度 2.68g/m^3 と比較して、工場生産コンクリートで使用した骨材の密度は $2.66\sim 3.00\text{g/m}^3$ と大きく、供試体の骨材-モルタルの境界 CT 値がファントムの示す境界に対して大きく、その結果、骨材率が大きく評価された可能性も考えられる。

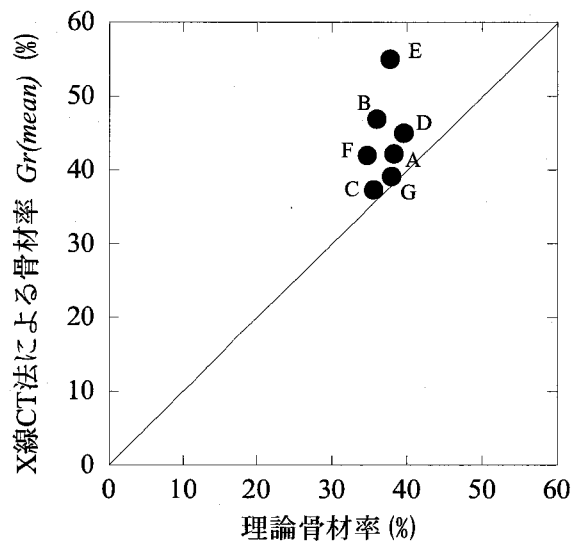


図-5.29 理論骨材率と X 線 CT 法による骨材面積率

5. 3. 5 モルタル平均 CT 値と水セメント比

図-5.30 は横軸を材料構成定量化法で求めたモルタル平均 CT 値 M_{CT} 、縦軸を撮影位置とし、その関係を示したものである。縦軸の 0mm は供試体の最下部、200mm は A~F 供試体の最上部、250mm は G 供試体の最上部を表す。A~F の供試体の直径が 100mm であるのに対して、G 供試体の直径は 125mm である。供試体の寸法が異なる場合には、CT 値の補正を行う必要があり、G 供試体については本章第 2 節の供試体寸法によるモルタル平均 CT 値への影響で述べた補正式 (5.7) を用いて直径 125mm のモルタル平均 CT 値を直径 100mm のモルタル平均 CT 値に補正した。

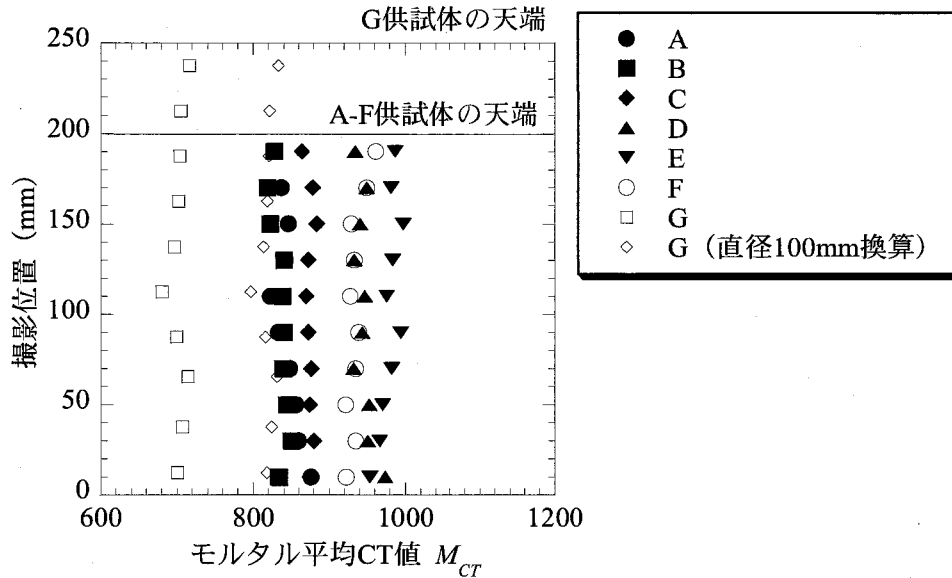


図-5.30 モルタル平均CT値の鉛直分布

図-5.30 に示すモルタル平均CT値の鉛直分布は、全体にわたり一様に分布している。水セメント比が55%程度である供試体A, B, Cよりも水セメント比が40%以下の供試体D, E, Fの方が高いモルタル平均CT値であることがわかる。また、水セメント比が72%と大きい供試体Gはモルタル平均CT値が低いことがわかる。

次に、供試体の各断面のモルタル平均CT値 M_{CT} を平均した値である供試体のモルタル平均CT値 $M_{CT} (mean)$ と水セメント比の関係を図-5.31 に示す。図には本章第2節で得られた室内作製コンクリート供試体のモルタル平均CT値 $M_{CT} (mean)$ もプロットしている。また、供試体の直径により、CT値は異なることから、本章第2節で述べた補正式(5.7)により直径100mmの供試体にCT値を補正している。

図-5.31 より、水セメント比とCT値の関係は反比例関係にあることが確認できる。室内作製コンクリートも工場生産コンクリートもばらつきはあるが、水セメント比が大きくなるとモルタル平均CT値が小さくなり、反比例の関係にあることがわかる。

X線CT法における材料構成定量化法で評価するモルタルは粒径1mm以下の細かな骨材を含んでいるが、同じ種類のセメントや同程度の密度の骨材、標準粒度の骨材を用いている場合には、水セメント比などの評価が可能であると考えられる。

一方、供試体A, Bのモルタル平均CT値は、ほぼ同じ水セメント比の他の供試体と比較して小さいことがわかる。これは、供試体A, Bで使用している粗骨材の表乾密度がそれぞれ 2.9 kg/cm^3 , 3.0 kg/cm^3 と高い密度であることが原因と考えられる。すなわち、これまでに使用した粗骨材と異なり、粗骨材の密度がファントムで使用している骨材(花崗岩 2.74 kg/cm^3)に比較して高く、しきい値である骨材-モルタルの境界CT値を実際よりも小さく評価してしまったためと考えられ

る。

また、供試体 G のモルタル平均 CT 値も他の供試体と比較して比較的小さな値となっている。これは、供試体 G が高炉セメント B 種を用いているためと考えられる。高炉セメント B 種は高炉スラグ微粉末をセメントの 30~60% を置換えており、セメントの物理的、化学的性質がかなり異なる。また、密度も普通ポルトランドセメントの 3.16g/cm^3 に対し、高炉セメント B 種は 3.04g/cm^3 であり、セメントの相違がモルタル平均 CT 値に大きく影響を与えたと考えられる。しかし、早強セメントを使用した供試体 D と F はこのような傾向はなく、普通ポルトランドと同様な傾向であった。

生コンで使用される材料は工場毎にそれぞれ異なり、粗骨材の密度やセメントの種類などが相違する場合には水セメント比-モルタル平均 CT 値の相関関係が異なる可能性があり、モルタル平均 CT 値から水セメント比などの配合を推定する際には十分な注意が必要である。配合推定の精度を高めるには、使用する材料毎に水セメント比の異なる供試体を作製し、それぞれについて配合推定式を求めることが望ましいと考えられる。

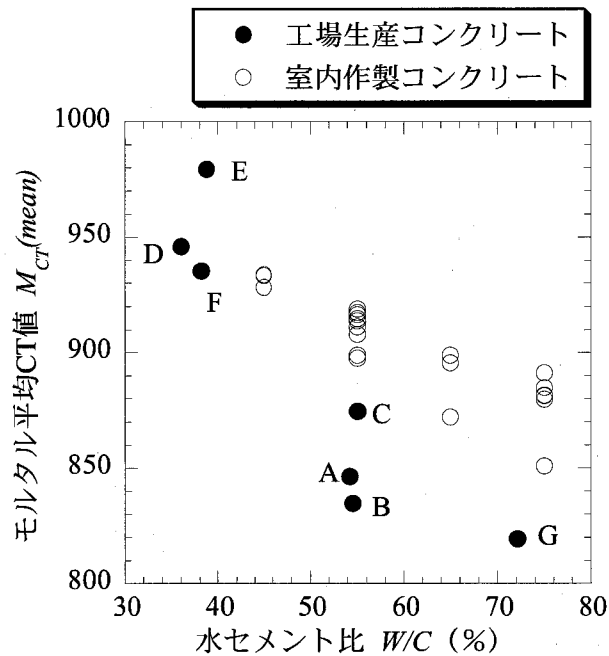


図-5.31 水セメント比とモルタル平均 CT 値

5. 3. 6 モルタル平均 CT 値と単位セメント量

各断面のモルタル平均 CT 値 M_{CT} を平均した供試体のモルタル平均 CT 値 $M_{CT} (mean)$ と単位セメント量の関係を図-5.32 に示す。図には水セメント比と同様に本章第2節で得られた室内作製コンクリート供試体のモルタル平均 CT 値もプロットしている。

まず、単位セメント量と CT 値の関係は比例関係にあることが確認できる。室内作製コンクリートも工場生産コンクリートもばらつきはあるが、単位セメント量が大きくなるとモルタル平均 CT 値が大きくなっている。

次に、供試体 A, B, G に関してモルタル平均 CT 値がほぼ同じ単位セメント量の他の供試体と比較して小さいことがわかる。これは前述したように、供試体 A, B で使用している粗骨材の表乾密度がこれまでに使用した粗骨材と異なり大きいことや供試体 G で使用しているセメントが高炉セメント B 種であることが原因と考えられる。

モルタル平均 CT 値から単位セメント量の推定を行う場合にも、骨材の密度やセメントの種類に留意し、推定の精度を高めるために、材料毎の推定近似式を用いることが望ましいといえる。

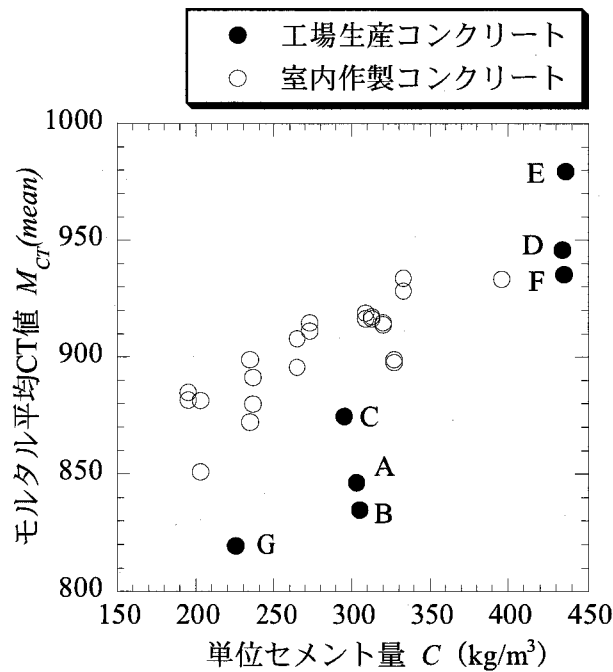


図-5.32 単位セメント量とモルタル平均 CT 値

5. 3. 7 粒度分布の解析

各コンクリート供試体の推定された骨材の推定粒度分布を図-5. 33 に示す。点線はBS 882(1992)によるコンクリート用骨材の標準的な粒度分布⁹⁾の上限と下限、実線は、X線CT法を用いて推定した粒度分布である。

図-5. 33 より、推定粒度は全体的に通過百分率が小さい粗粒側にあり、標準粒度と比較するとG供試体を除いて、全体的に粗い粒度として評価していることがわかる。特に、B供試体では推定粒度が標準粒度の範囲を超えて粗粒側にある。標準粒度との相違は、X線CT法による推定粒度が一断面の2次元断面の評価であり、3次元で評価される実際の粒度とは異なることが原因と考えられるが、全体的には粒度分布の形状は供試体毎にばらつきが少なく、バランスよく骨材が配合されていると考えられる。なお、G供試体については、粗骨材の最大寸法が40mmであるにも関わらず20mm程度で示されているが、これも2次元断面で評価されたためであると考えられる。

なお、粒度分布の解析方法は第4章8節を参照されたい。

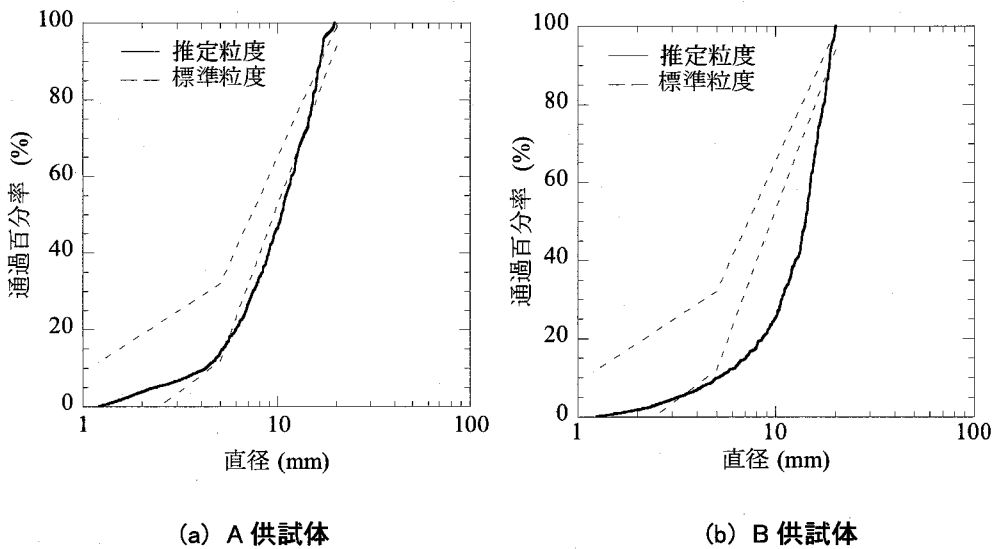


図-5. 33 粒度分布 (次ページにつづく)

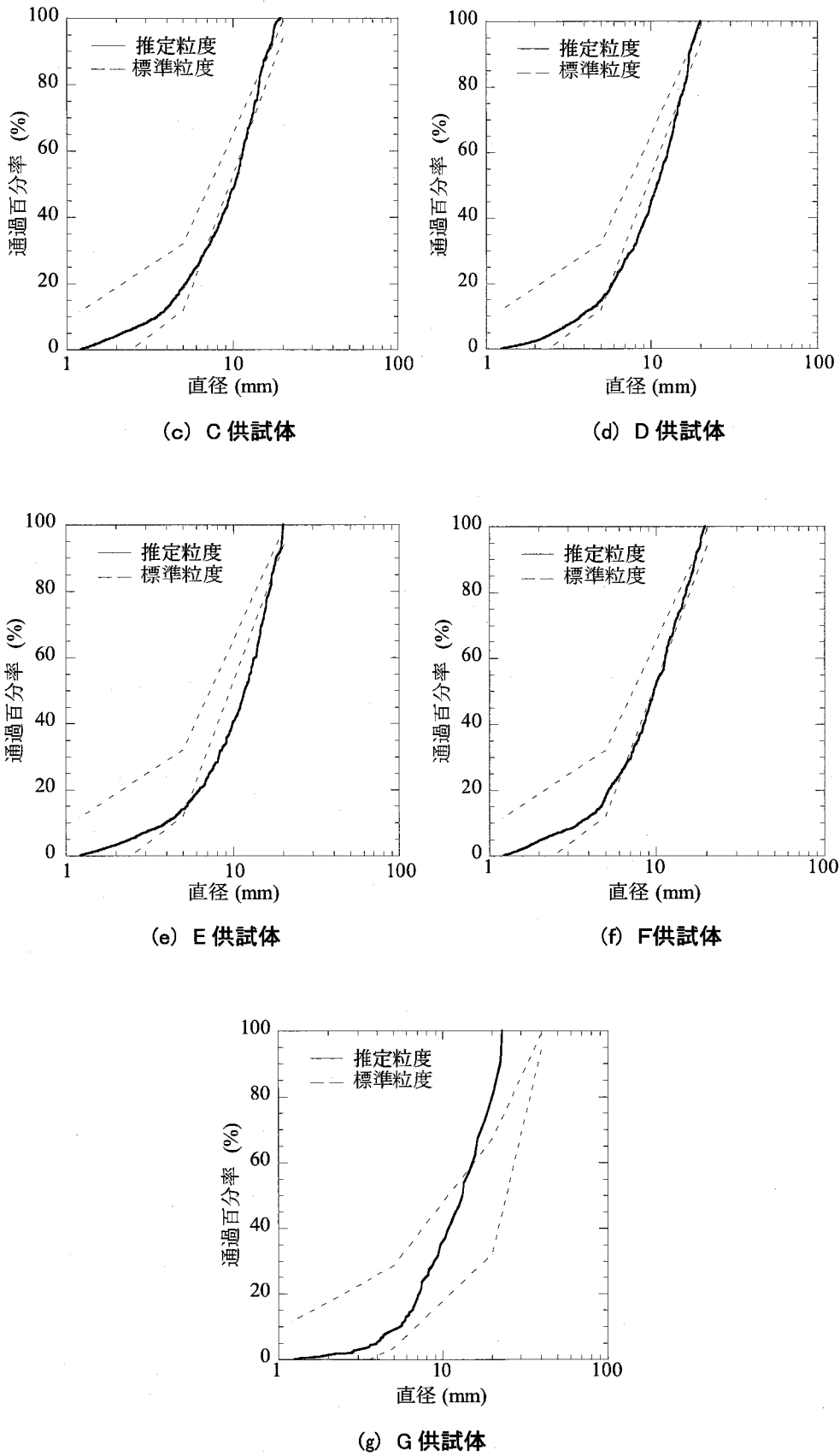


図-5.33 粒度分布

5. 4 結言

本章では第4章で提案した材料構成定量化法を適用して、材料や配合の異なるコンクリート供試体の構造特性評価、すなわちコンクリート供試体の骨材率、空隙率、モルタル平均 CT 値の評価を行った。

第2節では、3種類の細骨材を用い、実験室内で水セメント比や細骨材率を変えたコンクリート供試体を作製し、X線CT法を適用した。まず、X線CT画像での空隙や骨材の面積率である空隙率や骨材率について供試体の深さ方向の分布を求め、さらに、配合上の理論値との比較を行った。理論値と評価値には少しの乖離があるものの、配合毎に理論骨材率が多いものはX線CT法による骨材率も多く、相対的にはX線CT法による評価が可能であった。次に、モルタル平均CT値に対する水セメント比や単位セメント量との相関を検討した。室内で作製されたコンクリート供試体の材料や配合の範囲内ではこれらの相関は高く、これらの相関関係を用いて水セメント比や単位セメント量など、配合を推定できることを明らかにした。また、本方法で評価された水セメント比や単位セメント量は、従来の配合推定方法である「セメント協会法」と呼ばれる方法と同程度以上の精度を有することが明らかとなった。さらに、供試体のX線CT画像から推定粒度分布曲線を求め、実際の粒度分布と比較を行い、粒径1mm以上を対象にした推定粒度分布において、粒径15mm以下の粒度分布は実際の粒度分布に近いものであることを確認した。

第3節では、九州の6つの生コン工場で生産された7本のコンクリート供試体にX線CT法を適用して空隙率、骨材率、モルタル平均CT値の評価を行った。それぞれの供試体は生産工場が異なり、使用される材料や配合が大きく異なるものであったが、モルタル平均CT値と水セメント比、単位セメント量の相関は高く、室内作製コンクリートで得られた相関とほぼ同様の傾向であることが確認できた。X線CT法における材料構成定量化法で評価するモルタルは粒径1mm以下の細かな骨材を含んでいるが、同じ種類のセメントや同程度の密度の骨材、標準粒度の骨材を用いている場合には、水セメント比などの評価が可能であると考えられる。一方、生コン工場で作製された供試体には粗骨材の密度が相当に高いものやセメントの種類が異なるものがあつたが、このような場合に水セメント比などを評価する際には注意が必要であることがわかった。粒度分布の推定においては、標準粒度の範囲の粗粒側に評価されたものの、各供試体の骨材は粒度のバランスが良好に配合されていることが確認できた。

X線CT法による配合推定をさらに高い精度で行う場合には、その材料ごとに推定近似式を求めることで対応が可能となると考えられる。具体的な方法として、使用する骨材毎に水セメント比の異なる供試体を作製して、X線CT法によりモルタル平均CT値を求め、図-5.13や図-5.14のような関係図を作成し、推定近似線を求める。推定対象のコンクリートにも同様にX線CT法を用いてモルタル平均CT値を求め、推定近似式を用いることで水セメント比や単位セメント量などの特性を推定、評価することができると考えられる。

【参考文献】 (第5章)

- 1) 天明敏行, 堤知明, 村上祐治, 尾原祐三, “X線CT法によるコンクリート供試体の非破壊検査”, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学協会, Vol.25-1, pp.1643-1648, 2003.6
- 2) セメント協会, コンクリート専門委員会報告 F-18, “硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験結果”, 1967
- 3) 岡田清, 六車熙, “コンクリート工学ハンドブック”, 朝倉書店, p.607
- 4) 笠井芳夫, 池田尚治, “コンクリートの試験方法(下)”, 技術書院, p.37, 1993
- 5) T.Temmyo, T.Tsutsumi, Y.Murakami, Y.Obara, “Estimation of structural characteristics of RCD by an X-ray CT method”, X-ray CT Geomaterials, Soiles, Concrete, Rocks, A.A.Balkema Publishers, a member of Swuets & Zeitlinger Publisher, pp.199-205, 2003
- 6) 天明敏行, 堤知明, 村上祐治, 尾原祐三, “X線CT法を用いた硬化コンクリートの水セメント比と単位セメント量の推定方法について”, 土木学会第57回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, 5-163, 2002.9
- 7) 天明敏行, 堤知明, 村上祐治, 尾原祐三, “X線CT法による水セメント比の推定について”, 土木学会第56回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, V-426, pp.852-853, 2001.10
- 8) 岡田清, 六車熙, “コンクリート工学ハンドブック”, 朝倉書店, p.338
- 9) A.M.Neville, “Properties of Concrete (Fourth edition)”, Pearson Prentice Hall, p.170, 2002

6章 コンクリート構造物の施工に関する評価

6.1 緒言

コンクリート構造物の施工における最大の特徴のひとつとして、コンクリートは時間の経過とともに硬化するという性質がある。この性質を利用して型枠に流動性のあるフレッシュコンクリートを流し込み、十分に締固めを行うことによって堅硬な構造物を築造することが可能となる。コンクリート構造物の施工時には、製造されたコンクリートを経時変化に留意し、材料の分離を抑制しながら運搬し、流動性のある間に打継ぎや締固めを行うことが重要である。また、コンクリートの締固めにおいては、振動が不足するとジャンカ発生の原因となるとともに、過振動は材料分離によるブリーディング発生の原因にもなることから、適切な締固めを行うことも重要である。このように、同じ材料や製造方法を用いて製造されたコンクリートでも施工の良否によって構造物の良否が決定する。したがって、コンクリート構造物の診断にあつては、材料の良否の診断を行うとともに、施工の評価を行なうことも重要である。

本章では、コンクリートの施工に関する評価として、第2節で、コンクリート材料の大きな特徴であるフレッシュコンクリートの経時変化について X線 CT法を用いた検討を行う。試験は、モルタル供試体を用いた X線 CT法による経時変化撮影のほか、特に、経時変化に伴うブリーディングが及ぼす影響を検討するために、X線 CT装置のスキヤノ撮影という機能を用いて、コンクリートの平面透過撮影を実施する。

第3節では、コンクリートダムにおいて、近年の合理化施工の代表である RCD工法について、現場から採取されたボーリングコアに X線 CT法を適用し、材料や空隙の分布特性を明らかにするとともに、供試体を用いた物理特性と比較検討し、施工評価を行う。

第4節では、鉄筋コンクリート構造物を対象とし、施工されたコンクリート橋梁の数箇所から供試体をサンプリングし、供試体のモルタル平均 CT値を用いてコンクリートの圧縮強度を評価する。

なお、本章の第3節で使用した X線 CT装置は(株)東芝所有の装置であり、第4節では2006年にソフトウェアを更新する前の装置「TOSCANER-23200」を使用している。このため、本章で用いた、材料構成定量化法では、材料を抽出するための二値化の方法は異なるが、基本的な手順は同様であり、得られる空隙率、骨材率、モルタル平均 CT値は第4章で述べた材料構成定量化法による値とはほぼ同様の値となることを確認している。

6. 2 コンクリート内部構造の経時変化

6. 2. 1 概説

(1) 試験概要

コンクリートの材料としての大きな特徴ひとつに、化学反応による経時変化がある。セメントに水を加えて練り混ぜると化学変化を生じ、初めの間は流動性を保っているが、時間の経過に伴い、しだいに流動性を失って固まり始める。さらに時間が経過し水和作用がセメント粒子の内部に向かって進むと、ペーストは硬化し始め強度を発現する。また、セメントは数種の異なった鉱物から成り立ち、これらの水和反応はそれぞれ異なり、かつ相互に影響を及ぼしあう。このようなセメントの水和現象は完全に解明されていないのが現状である。

一方、コンクリートのブリーディング (bleeding) とは、コンクリートの打設後、経過時間とともに骨材に比べ比重が小さい水が表面に浮きでてくる現象のことである。コンクリートは打設後に生じるブリーディング現象により、表層部にはレイタンスといわれる弱化層が形成され表層強度の低下を招くことになる。それに伴い、表面からの有害物質の侵入、コンクリート表面の摩擦劣化、埃の発生、ひび割れおよび仕上げ材の膨れ剥離などを引き起こし、コンクリートの力学的特性、水密性および耐久性を低下させる。特に、水セメント比の大きいコンクリートにおいては、ブリーディング現象が顕著となるため、耐久性、安全性および景観の面においても問題となることが多い。このため、通常は AE 剤などの混和剤を用いて防止する。

コンクリートに X 線 CT 法を適用する場合にはまず、複雑なセメントの水和現象が X 線吸収率に及ぼす影響を把握しておく必要がある。そこで本節第 2 項では、水セメント比の異なるモルタルで円柱供試体を作製し、モルタルをモールドに設置後の供試体を時間経過とともに X 線 CT 撮影し、セメントの硬化過程での CT 値の変化を分析する。

第 3 項では、コンクリートの施工において配慮が必要なブリーディング現象の可視化による解明を行う。コンクリートのブリーディング量は、ブリーディング試験方法 (JIS A 1123) を用いて測定するが、実際のブリーディングの発生範囲や水の上昇のメカニズムを解明することは困難である。コンクリート内部で起こっている現象を可視化するために X 線 CT 法は有効な方法として考えられるが、本研究で用いている産業用 X 線 CT 装置は水平断面の CT 撮影しか実施できない。そこで、X 線 CT スキャナのスキャノ撮影という機能を用いてブリーディング現象を検討した。スキャノ撮影とは、レントゲン撮影の透視像のような鉛直方向の平面透過撮影を行うものである。供試体は厚さの薄い木製型枠を作製し、粗骨材の最大寸法 13mm のコンクリートを打込み後、連続的に 1 日間撮影を行い、ブリーディングの発生する範囲や発生状況について検討した。

6. 2. 2 モルタルの経時変化試験¹⁾

(1) 使用材料

モルタルの使用材料を表-6.1に示す。供試体は直径5cm、高さ10cmの円柱供試体であり、水セメント比が45%、55%、65%、75%の4種類を1供試体ずつ作製した。各水セメント比のモルタルの配合を表-6.2に示す。

表-6.1 使用材料

材 料	適 用
セメント	普通ポルトランドセメント 密度：3.16g/m ³
細骨材	静岡県大井川産 表乾密度2.62g/m ³ 吸水率1.17%

表-6.2 モルタルの配合

W/C (%)	単位量(kg/m ³)		
	W	C	S
45	302	671	1140
55	306	556	1225
65	310	477	1280
75	316	421	1311

(2) X線 CT 撮影

X線 CTの撮影条件は管電圧300kV、スライス厚1mmとした。撮影対象領域150mmに対し、撮影画素数は1024×1024ピクセルに設定したため、1ピクセルの1辺の長さは0.146mmとなる。

4種類のモルタルは撮影開始直前に同時に練混ぜ、プラスチックモールド型枠に打込み、水分の蒸発を防ぐためにモールドにラップで蓋をした。その後、4供試体をターンテーブルに設置して同時に撮影を開始した。ターンテーブルに設置した供試体の状況を写真-6.1に示す。

撮影は供試体の上から25mm、50mm、75mmの3断面で行った。練混ぜ（加水）からモルタル打込み完了して撮影位置に設置するまでの時間は約10分であり、撮影は表-6.3に示すような間隔で実施した。なお、供試体名のSH25~75とは、撮影位置が下から25~75mmを表している。撮影時間は約5分であり、撮影中はターンテーブルが回転するため、若干の振動が供試体に伝わる。



写真-6.1 供試体の設置状況

表-6.3 撮影時間の間隔

	開始 ～120分	120分 ～240分	240分 ～480分	480分 ～3600分
SH75 下端から 75mm (上部)	30分	30分	60分	720分
SH50 下端から 50mm (中心部)				
SH25 下端から 25mm (下部)	5～15分	15～60分		

(3) 撮影結果

1) 供試体断面の経時変化と差画像

撮影画像の例として SH25 の撮影開始時の断層画像を図-6.1 に示す。直径 150mm の撮影領域の円の中に 4 つの $\phi 50$ mm の円柱供試体が撮影されている。また、供試体の外側にはモールドが薄く写っている。供試体中の白い部分は CT 値の高い骨材であり、黒い部分は CT 値の低い空隙である。供試体は水セメント比が時計周りに順に 45%、55%、65%、75%であるが、撮影画像からは水セメント比の相違は判別不可能である。

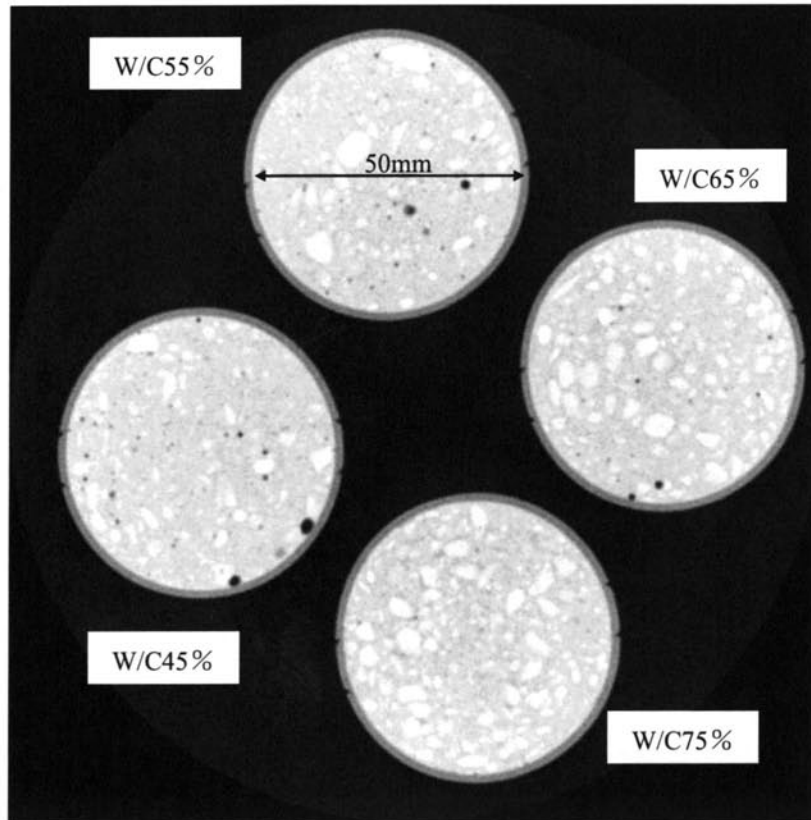


図-6.1 開始時の断面画像 (SH25)

次に、図-6.1 に示した撮影開始時の CT 画像を水セメント比毎に拡大した画像を図-6.2 に示す。同様に撮影開始から 3383 分後（約 56 時間後）の CT 画像を水セメント比毎に拡大した画像を図-6.3 に示す。撮影開始時と 3383 分後の CT 画像はほとんど同じ画像に見えるが、図中に白い線で囲んだ箇所では時間経過後に黒い空隙が出現しており、部分的に空隙が移動していることがわかる。

CT 画像の目視診断では、経過後の差を評価することが困難であるため、ここでは差画像による評価を行う。差画像は、2つの X 線 CT 画像の同じ位置にあるピクセルの CT 値との差を示した画像である。したがって、2つの画像が全く同じ変化がなければ、差画像の CT 値は 0 である。開始時の画像から着目する時刻の画像を差し引いた差画像の場合、着目する時刻の CT 値が開始時よりも小さい値に変化していれば、差画像はプラスの CT 値となり、白く表示され、反対に開始時よりも大きい値に変化していれば、差画像はマイナスの CT 値となり、黒く表示される。図-6.2 と図-6.3 の差画像を図-6.4 に示す。

図-6.4 に注目すると、黒い線で囲んだ範囲のように白や黒の小さな円形のものが散在しているのが確認できる。これはモルタルにブリーディングが発生し、撮影断面内のある場所に存在していた水や空隙などが移動して、時間経過後にその断面から出現あるいは消失したためと考えら

れる。開始時の撮影断面にモルタルが存在し、時間経過後に水や空隙が出現した箇所は CT 値の差がプラスの CT 値となり白く表示され、反対に開始時に水や空隙存在し、時間経過後に水や空隙が消失してモルタルが占有した箇所は CT 値の差がマイナスの CT 値となり、黒く表示される。

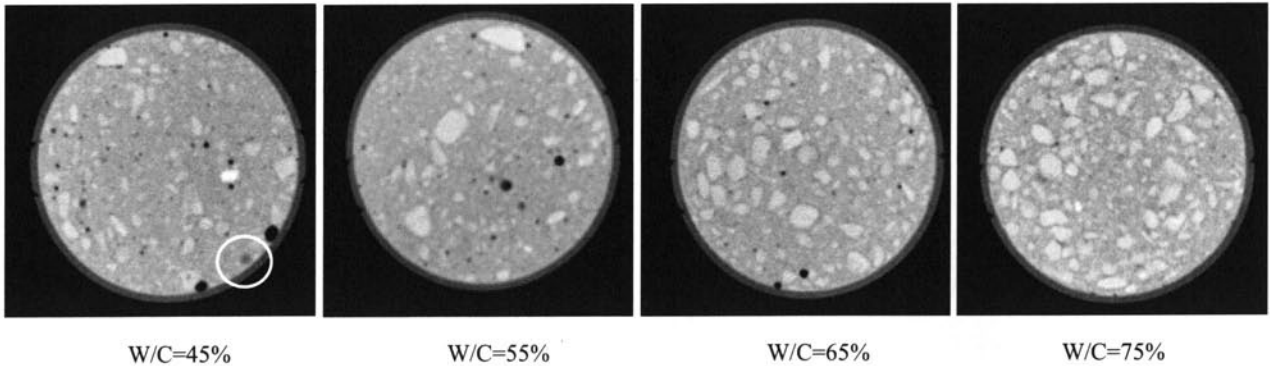


図-6.2 開始時の CT 画像

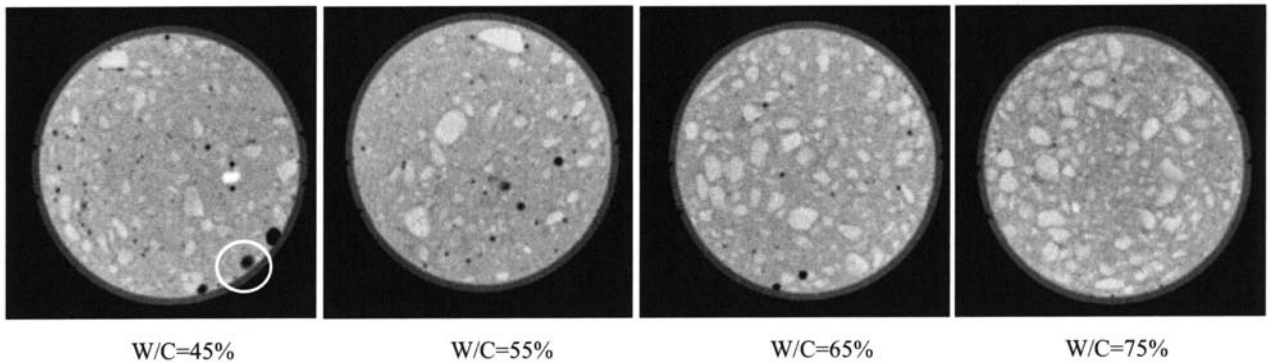


図-6.3 3383 分後の CT 画像

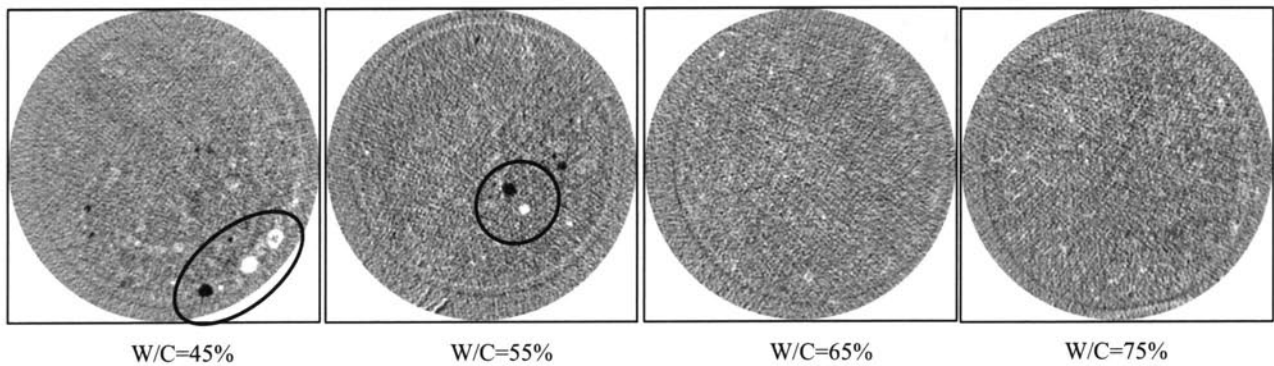


図-6.4 差画像

2) 供試体断面の平均 CT 値

モルタル供試体の平均 CT 値の経時変化を検討するために、各供試体の断面の同じ位置において、供試体の大きさと同じ直径 50mm (90,824 ピクセル) の平均 CT 値を求めた。SH25 の位置における撮影開始から終了までの全ての経過時間に対する平均 CT 値の変化を図-6.5 (a) に、撮影開始後 480 分 (8 時間) までを拡大をしたものを図-6.5 (b) に示す。

水セメント比の小さいモルタルは、骨材を除くセメントペースト部の密度が大きいが、CT 値の大きい骨材の割合が少なくなるため、水セメント比が小さいモルタルの CT 値は必ずしも相対的に大きくなってはいない。各モルタルの平均 CT 値は、撮影開始後約 50 分後までは緩やかに上昇し、その後 450 分程度までの上昇はさらに緩やかになっている。その後はデータがばらついてきているが、CT 値に全体的な変動はない。したがって、450 分程度で CT 値の変化に影響を及ぼすコンクリート硬化の反応は終了していると考えられる。

次に、撮影開始時からの CT 値の変化量を ΔCT とし、コンクリートの反応が収束するまでの 450 分における ΔCT の経時変化を図-6.6 に示す。図より CT 値が収束するまでの上昇量 ΔCT はおよそ 10~25 であり、密度に換算すると $0.010 \sim 0.025 \text{g/cm}^3$ とわずかな値であるといえる。

モルタルが硬化する過程ではブリーディングが生じ、供試体型枠にモルタルが打込まれた後、時間経過とともに骨材と比較して比重の小さい水分が上昇して表面に浮き出てくる。すなわち、ブリーディングの発生後には上昇して除去された水の分だけモルタル部の密度が増加している可能性がある。しかし、図-6.4 の差画像から、水あるいは空隙が移動したのは水セメント比の小さい 45% と 55% のモルタルであり、今回の試験では水セメント比の小さいモルタルでもブリーディングが発生していた。また、図-6.6 の ΔCT 値の上昇量に着目すると、水セメント比の小さ

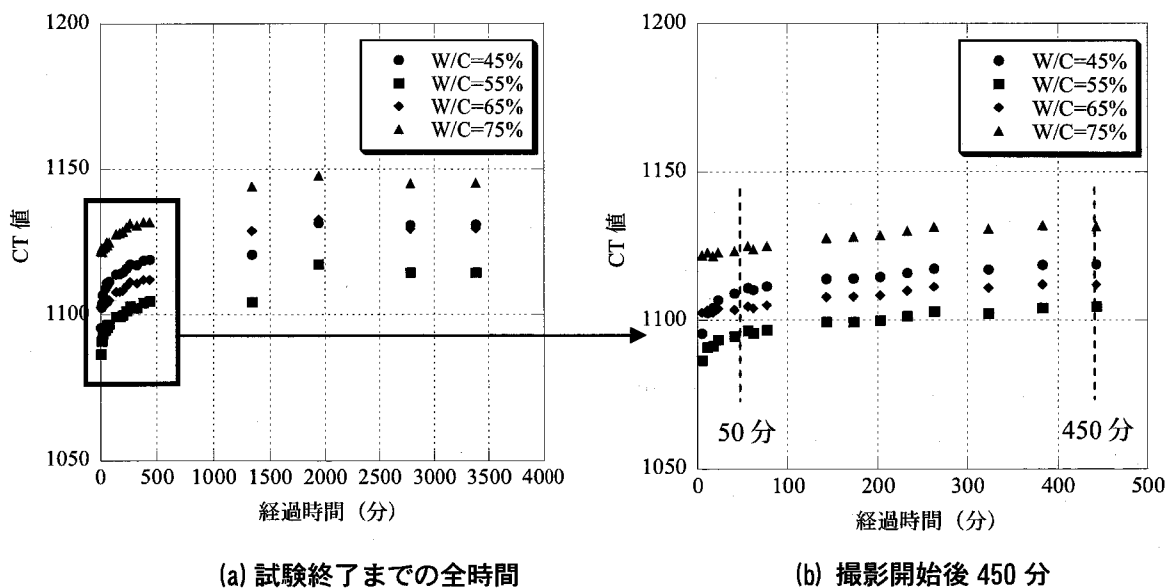


図-6.5 平均 CT 値の経時変化 SH25

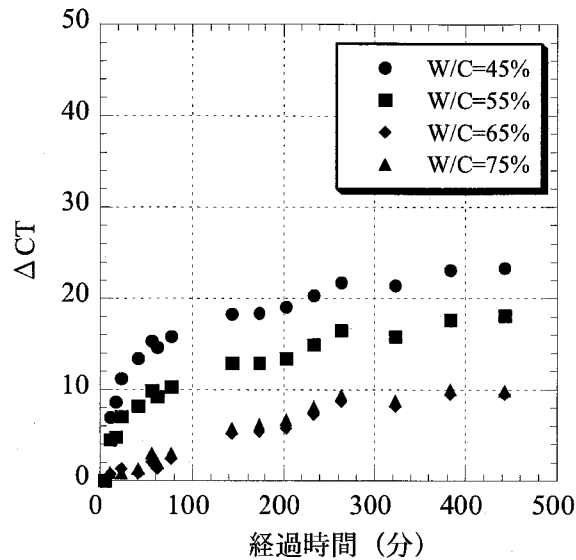


図-6.6 平均 CT 値の上昇量の経時変化 SH25 (下から 25mm)

いモルタルほど CT 値の増加が大きい傾向である。一般的にはブリーディングは水セメント比の大きいコンクリートで発生しやすいことから、CT 値の上昇はブリーディング以外の要因も影響を及ぼしているとも考えられる。

硬化にともなう CT 値の上昇量はわずか 10~25 であり、これがブリーディングの発生によるモルタルの密度の上昇分であるのか、セメントの水和反応によってモルタルが凝結して CT 値が変化したのかは不明である。あるいは、X 線 CT 装置自体の持つ特性であることも考えられる。しかし、CT 値の上昇量が密度に換算して $0.010 \sim 0.025 \text{g/cm}^3$ とわずかな値であることから、セメントの水和反応によってコンクリートやモルタルが凝結するような化学変化に起因するモルタルの密度や X 線吸収率の変化を考慮する必要はないと考えられる。

6. 2. 3 コンクリートのブリーディング現象²⁾

(1) コンクリートの使用材料と配合

試験で使用したコンクリートの使用材料はセメント、水、細骨材、粗骨材である。粗骨材の最大寸法は、幅の狭い型枠に合わせて13mmとした。コンクリート材料として使用したセメント、細骨材、粗骨材の諸元を表-6.4に、コンクリートの配合を表-6.5に示す。コンクリートの配合はスランプ8cmの土木用コンクリートであり、水セメント比を55%とした。

表-6.4 使用材料

材 料	適 用
セメント	普通ポルトランドセメント 密度：3.16g/m ³
細骨材	静岡県大井川産 表乾密度 2.62g/m ³ ，吸水率 1.17%
粗骨材	埼玉県秩父産，最大粒径 13mm 表乾密度 2.73g/m ³

表-6.5 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 Gmax (mm)	目標 スランプ SL (cm)	水セメント 比 W/C (%)	空気量 air (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
					水	セメント (普通)	細骨材	粗骨材 20~5mm
					W	C	S	G4
13	8	55	2	40	185	336	721	1127

(2) 供試体

コンクリートの供試体は、平面透過撮影であるX線スキャナ撮影を実施することを考慮して、長さ300mm、高さ300mm、厚さ60mmとした。撮影は、写真-6.2および図-6.7に示すような木製型枠にコンクリートを打込んで実施した。練り混ぜ時の室温とコンクリート温度はどちらも9℃であった。



写真-6.2 X線スキャノ撮影用の型枠

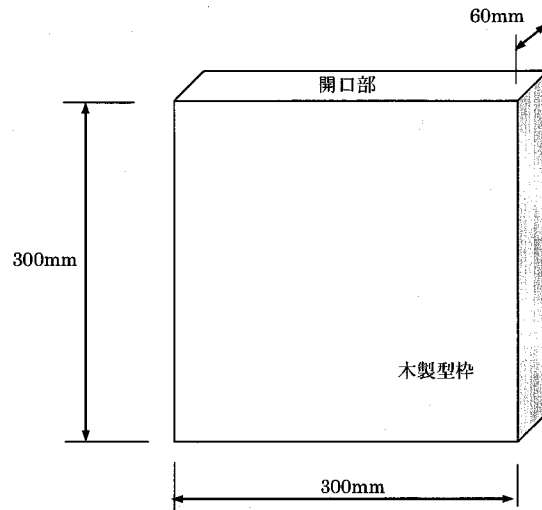


図-6.7 供試体の形状

(3) X線スキャノ撮影

X線スキャノ撮影とは、X線CTスキャナを用いてレントゲン撮影の透視像のようなX線の平面透過撮影を行うものである。撮影管電圧は300kV、管電流は2.0mAである。スキャノ撮影は600mm×600mmの対象領域に対して半分ずつ行われる。供試体はX線発生装置に対して直角になるようにターンテーブルが動き、角度を変えて合計4回実施される。スキャノ撮影におけるデータ収集のイメージを図-6.8に示すが、エリアを半分ずつ撮影する中で、より精度（分解能）を上げるために、検出器のピッチの中間の位置を補正するために若干テーブルを回転させて2回ずつ行われる。このようにして176個の検出器で得られた2回分のX線吸収率を数値計算により再構成し、平面画像を得ることができる。1回の撮影時間は約2分30秒である。

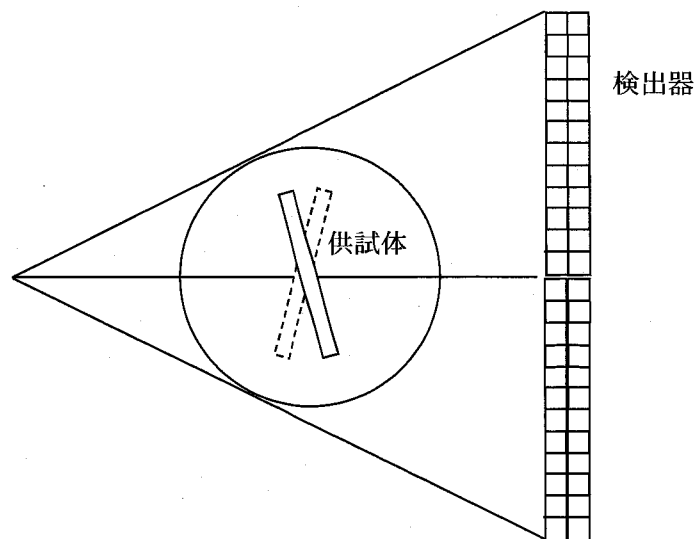


図-6.8 X線スキャノ撮影概要図

X線スキャノ撮影による撮影画像には、X線 CT 画像と同様に各ピクセルに X 線の吸収率を表す CT 値が与えられ、数値処理が可能である。CT 値は物体の密度に比例することから、画像は物体の密度の平面分布が画像の濃淡の分布として表示されていることになる。画像の解像度は 1024×1024 ピクセルであり、1 ピクセルの 1 辺の長さは 0.586mm となる。撮影時にはターンテーブルが回転するので、若干の振動がコンクリートに伝達する。

(4) 撮影間隔

練混ぜ（加水）から練り混ぜ終了までの時間は 5 分であり、コンクリートの打込み完了までの時間は約 10 分であった。その後直ちに撮影を開始し、撮影開始から 1 時間 30 分までは 5~10 分間隔、その後約 6 時間までは 30~60 分間隔で撮影を行い、最後に 22 時間後に撮影を実施した。

(5) 撮影結果

撮影開始時の画像と約 6 時間後の画像を図-6.9 に示す。外側の白い部分は木製型枠の栈木部であり、その内部が合板型枠と厚さ 60mm のコンクリートを透過した画像である。X 線 CT 画像とは異なり、骨材や空隙などはそれほど鮮明に表示されていないが、白い部分は黒い部分よりも CT 値が高く、密度が高いことを示している。開始直後と約 6 時間後の画像について、撮影画像の目視評価では相違を認めることが困難である。なお、図中の a-a' 線は供試体中央部の鉛直方向の着目線を示したものである。

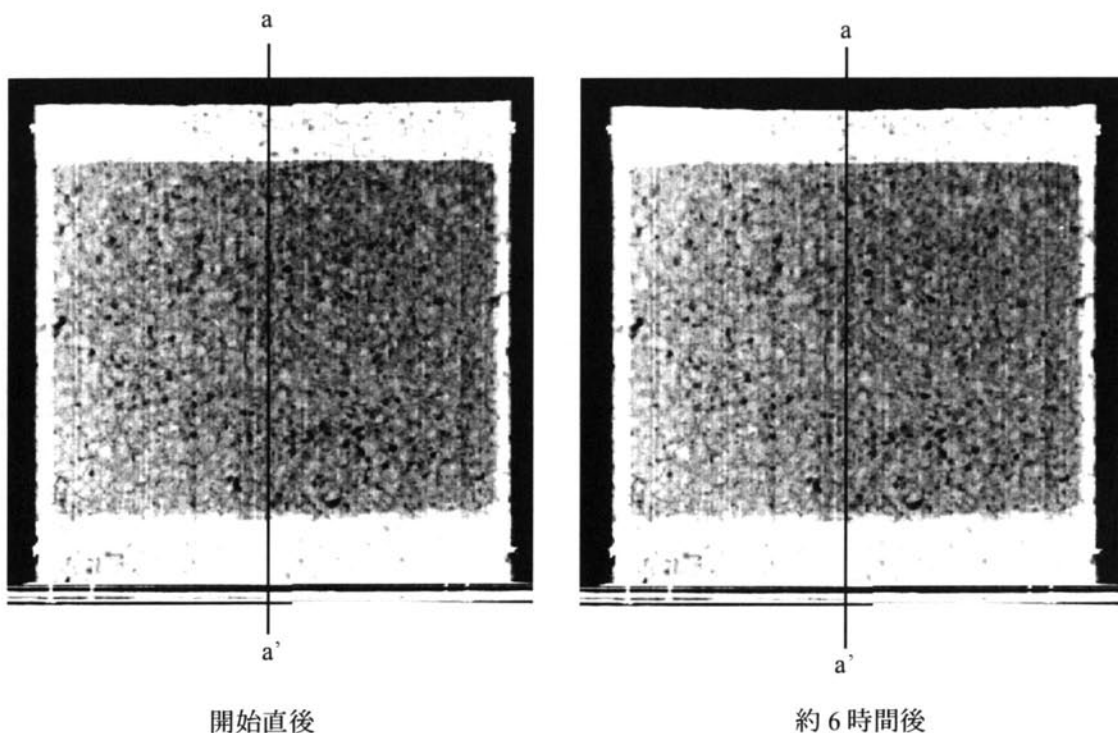


図-6.9 スキャノ撮影画像

次に、開始時の画像の CT 値から約 6 時間後の CT 値を差し引いた差画像を図-6.10 (a) に示す。差画像では経時的に変化がない部分に関しては差分 CT 値が 0 となり、ブリーディングによる水の移動などが起こると CT 値が変化し、その差が発生する。例えば撮影開始時にコンクリートであった箇所に空気や水が置換されると CT 値の差はプラスとなり、白く表示される。

図-6.10 (a) の差画像では図示した点線を境界として、上部の中心付近で画像の変化が大きいことがわかる。中心部で変化が大きいのは、側部では型枠による拘束により水の移動が少ないためと考えられる。この変化のある部分をよく観察すると、図-6.10 (b) に示した拡大図のように、上部で白く、下部で黒い部分が隣接して分布していることがわかる。これは水が上部に移動したことを示している。さらに、図-6.10 の上部に白い層が見えているが、これはブリーディングによりコンクリートの上部表面に水が溜まった様子を示している。

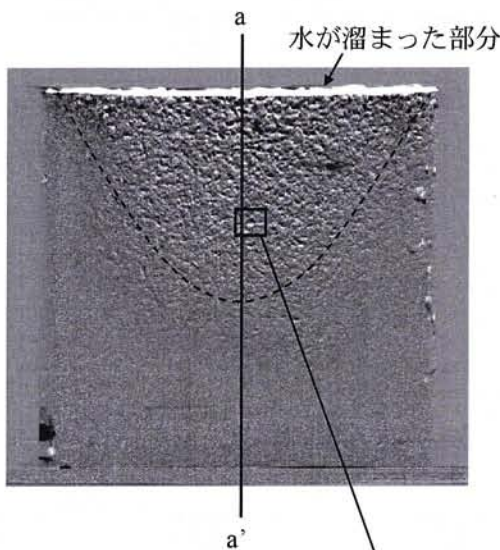


図-6.10 (a) 差画像

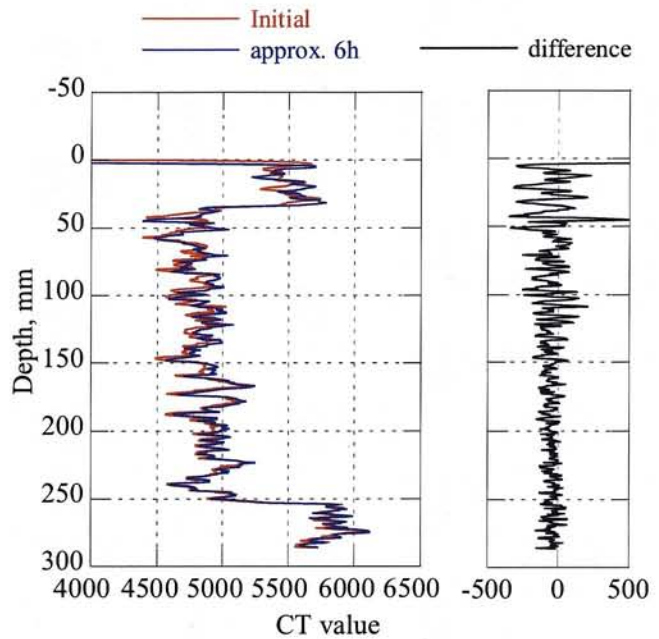


図-6.11 中心部の CT 値の分布 (a-a')

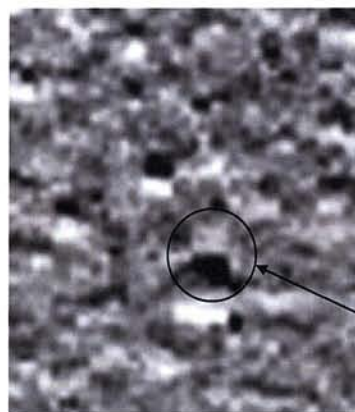


図-6.10 (b) 差画像の拡大図

次に、開始直後と約 6 時間後における中心部 a-a' 線の深度方向の各 CT 値とその差の分布を図-6.11 に示す。上部では CT 値の差が大きいが、深さ 150mm 以深では 2つの画像の CT 値の差の分布は小さくなり、収束してほとんど変化がなくなっていることが認められる。このように、CT 値の数値分布からもブリーディングの発生している範囲を数値的に把握することができる。

次に、図-6.12 に示すような供試体の上部と下部の範囲について、平均 CT 値の経時変化を検討した。上部と下部の平均 CT 値の経時変化を図-6.13 に示す。図より平均 CT 値は上部の方が小さいことがわかる。これは、初期の段階で材料分離が発生し、骨材が下部に、空隙や水分が上部に移動したためと考えられる。

また、上部、下部ともに、80 分程度までの間に CT 値が上昇していることがわかる。この現象は本節第 2 項で述べたモルタルの CT 値が上昇する現象とよく似ており、ブリーディングによって水が上昇することによって、除去された水の分だけモルタル部の密度が増加している可能性がある。上部と下部で経時時間とともに CT 値の上昇速度を比較すると、上部の方が CT 値の上昇速度が大きい。これは、上部ほどブリーディングの程度が大きく、上昇して除去された水の量が大きいためであると考えられる。80 分以降、CT 値はほぼ一定であり、経過変化はほとんどない。コンクリートの硬化にともないブリーディングが沈静化し、水の移動が止まると密度の変化がなくなることから平均 CT 値が収束する。

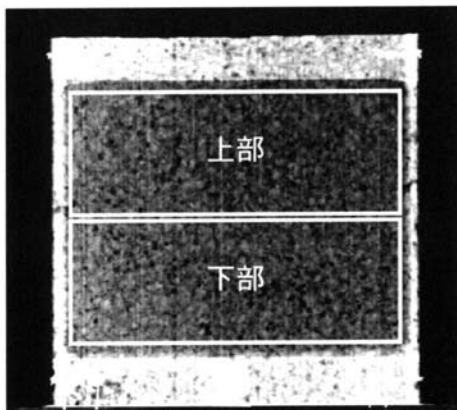


図-6.12 平均 CT 値を求めた
上部と下部の範囲

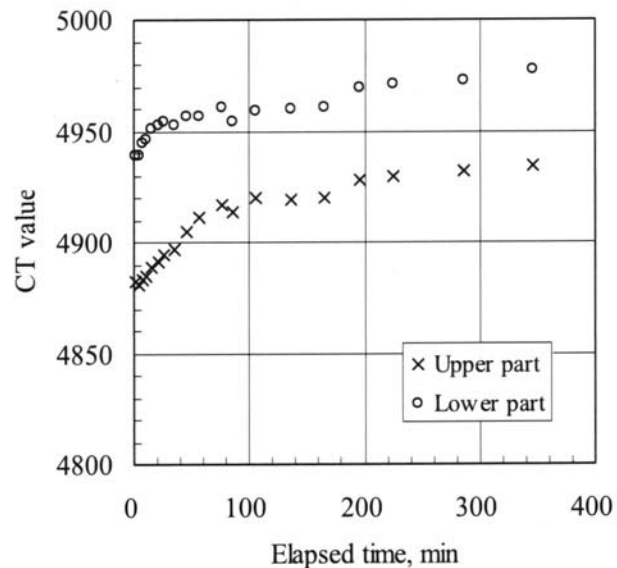


図-6.13 上部と下部の平均 CT 値の経時変化

6. 2. 4 まとめ

コンクリート材料の大きな特徴であるフレッシュコンクリートの経時変化について X 線 CT 法を用いた検討を実施した。試験は、モルタル供試体を用いた X 線 CT 法による経時変化撮影のほか、特に、経時変化に伴うブリーディングが及ぼす影響を調査するために、X 線 CT 装置のスキヤノ撮影という機能を用いて、コンクリートの平面透過撮影を実施した。

第2項では、X 線 CT スキャナで水セメント比の異なるモルタルの硬化の過程を撮影し、セメントの水和反応によってモルタルが凝結する際の CT 値の経時変化を撮影した。その結果、モルタルの CT 値は硬化時にわずかながら上昇していることが明らかとなった。しかし、その上昇量は密度に換算して $0.010\sim 0.025\text{g/cm}^3$ とわずかな値であることから、セメントの水和反応に起因するコンクリートやモルタルの凝結による CT 値の変化を考慮する必要はないと考えられる。

第3項では、コンクリートの施工にあたって配慮すべきブリーディングという現象に対し、実際のブリーディングの発生範囲や水の上昇機構を解明するために、X 線 CT スキャナのスキヤノ撮影という機能を適用して検討した。

まず、撮影開始直後と 6 時間後の CT 値の差画像から、供試体の上部かつ、中心付近でブリーディングが顕著に発生していることが明らかとなった。このことは、撮影直後と 6 時間後の供試体中央部鉛直方向における CT 値の分布の差からも確認できた。

次に、供試体を上部と下部に分割し、それぞれの平均 CT 値の経時変化を分析した。この結果、どちらも撮影開始後 80 分程度までの間に CT 値が上昇し、その後は安定することが明らかとなった。これはコンクリートの硬化過程で発生するブリーディングの影響と考えられ、上部と下部の CT 値の上昇速度の関係から上部ほどブリーディング量が大きいと推察した。

また、厚さの薄い供試体を用いて X 線 CT スキャナ撮影を行うことにより、ブリーディングの発生する範囲などが明らかになったことから、ブリーディングの発生メカニズムを検討するための X 線スキヤノ撮影の有効性が明らかとなった。

6.3 RCD 供試体の X線 CT 分析による強度特性評価^{3), 4)}

6.3.1 概説

RCC (Roller Compacted Concrete) 工法は、超硬練りコンクリートをブルドーザで敷均し、振動ローラで振動転圧を行う工法であり、1960年代以降、ヨーロッパやアメリカを中心に、コンクリートダム の 合 理 化 施 工 方 法 と し て 開 発 さ れ た⁵⁾。日本におけるRCD (Roller Compacted Dam-concrete) 工法は、RCC工法の範疇にあるといえるが、日本独自の開発によってダムの設計は従来工法のコンクリートダムと同等としていることから、設計にも合理化を図った他国のRCC工法とは異なり、品質的に優れているといえる。このため、水平打継面には必ずグリーンカットをすることとしており、1層を30cm程度の厚さで敷均して振動転圧を連続で行うRCC工法に対して、RCD工法では1層の厚さが25cm以下の薄層で複数の層を敷均し、1リフトの厚さが75cmまたは1mとなったところで振動転圧を行うという違いがある⁶⁾。

RCD工法では、1リフトの厚さをできるだけ厚くすることが打継ぎ面の処理回数を減らす施工の合理化につながる。現状1リフトの厚さは1mが最大であるが、合理化を進めるためには、振動転圧によってリフト全体をできるだけ均一にかつ密に締固めることが課題といえる。

1977年に初めてRCD工法がダム本体に採用された島地川ダムでは、合計370mの供試体を採取し、1リフト内のコンクリートの強度分布について調査された。この結果、75cmのリフト厚で施工された場合には、下層に対し上層で平均27%の強度低減傾向が認められた⁷⁾。また、RCD工法による初の大規模ダムの施工となった玉川ダムの75cmのリフト厚での試験施工では、下層に対し上層で10~20%程度強度が低下する、いわゆる「上弱下強」の現象が確認された。一方、1mのリフト厚においてVC値が5秒および17秒の場合には、下部の強度が上部のそれを上回ってはいるが、VC値30秒の場合にはそれが逆転する結果も確認された⁸⁾。

このようにRCD工法において、リフト内で強度分布にばらつきが発生する要因について、足立、白井⁸⁾はコンクリートのコンシステンシーやブルドーザの締固め効果、打継モルタルを挙げた。また、國分⁹⁾は「上弱下強」となる原因として上層部におけるエントラップドエアの増加のほか、新中野ダムでのコア観察から振動ローラ通過時に発生すると考えられる粗骨材下部の微小ひび割れを指摘した。

RCD用コンクリートは有スランプコンクリートと異なり、振動締固めによるコンクリートの流動化やブリーディングの現象が十分に解明されていないため、リフト内の強度分布の発生原因については確立された説がないが、RCD工法の合理化を進める上で、これを解明することは重要である。このためには、鉛直方向の骨材やモルタルの密度などの物性分布を詳細に調査して評価することが有効であると考えられる。

本研究では、RCDのリフト内の物性分布を評価する目的で、試験施工から採取したRCD供試体に対して、圧縮強度試験や超音波伝播速度計測などの物理試験を実施するとともにX線CT法を適

用した。そして、物理試験から得られた物性値の分布状況とX線CT法で得られたコンクリートの構成材料の分布状況を比較しながら、骨材や空隙の形状や分布状況が3次元で定性的に評価を行い、X線CT法の有効性を確認するとともに、RCDのリフト内で物性の分布が発生する原因の推定を行った。

6. 3. 2 RCDの使用材料, 配合および施工仕様

RCD用コンクリートの結合材は中庸熟ポルトランドセメント（密度 3.21kg/cm^3 ）とフライアッシュ（密度 2.14kg/cm^3 ）であり、フライアッシュの置換率は30%である。骨材は砂岩岩塊混在岩で、骨材の最大寸法が150mm、粗骨材は4分級されている。骨材の物性を表-6.6に示す。細骨材中の0.15mm以下の微粒分量は7~9%である。RCD用コンクリートの配合を表-6.7に示すが、単位結合材量は 100kg/m^3 と国内のRCD用コンクリートとしては少ない配合である。

敷均し、締固めに用いた機械は15t級ブルドーザおよび起振力225,600N、機械質量10,800kgの振動ローラである。1リフトの厚さは1mで、敷均しは5層撤出し、振動ローラによる転圧回数は16回（ケースA）と12回（ケースB）の2ケースを実施した。

表-6.6 骨材の物性値

項目		表乾密度	吸水率	単位体積質量	実積率	粗粒率	
試験方法		JIS A1109, 1110		JIS A 1104	JIS A 1104	JIS A 1102	
単位		(g/cm^3)	(%)	(t/m^3)	(%)	—	
粗骨材	G1	150-80mm	2.68	0.15	1.47	55.1	9.94
	G2	80-40mm	2.68	0.33	1.57	58.7	8.45
	G3	40-20mm	2.68	0.56	1.57	58.9	7.89
	G4	20-5mm	2.67	0.44	1.53	57.5	6.72
細骨材	S	5-0mm	2.65	1.47	1.69	64.7	2.63

表-6.7 RCD用コンクリートの示方配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	目標 VC 値 (秒)	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m^3)											
				水	セメント	フライアッシュ	細骨材	粗骨材				AE 減水剤			
								W	C	F	S		G1	G2	G3
Gmax		W/(C+F)	s/a												
150	15	95	32	95	70	30	724	389	389	389	388	(C+F) × 0.25%			

6. 3. 3 物理試験方法

転圧回数の異なる各ケースから3本ずつの供試体（A-1, A-2, A-3 および B-1, B-2, B-3）を採取した。ボーリングした各供試体は直径が20cmで、その長さは1リフトに当たる1mである。

試験の一覧表を表-6.8に示す。各ケースについて、コア観察、敷モルタルの影響範囲を確認する試験、供試体を上部と下部に分割した物性試験、さらに1mの供試体全体に対して、超音波伝播速度測定（鉛直方向を測定）とX線CT法の適用を行った。

供試体を上部、下部に切断する方法は、図-6.14に示すように、1000mmの供試体を500mmずつに切断し、切断されたそれぞれの供試体の上部と下部の50mmを切断する方法で行った。切断された円柱供試体は直径200mm、高さ400mmであり、上部・下部それぞれの供試体について圧縮強度試験、単位容積質量測定、静弾性係数測定、超音波伝播速度測定（直径方向を測定）を実施した。

直径方向の超音波伝播速度測定とX線CT撮影は、A-2とB-3の供試体に対して同じ断面で実施した。各供試体はそれぞれ図-6.15に示すように長さ500mmに切断し、測定と撮影はそれぞれ20mmごとに行った。測定と撮影の断面は各供試体とも合計50断面である。

なお、X線CT法の試験方法とその結果については本節第5項のX線CT法による評価で詳細に述べる。

表-6.8 試験の一覧表

試験施工の試験ケース		ケースA 転圧回数16回			ケースB 転圧回数12回		
		A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3
採取したRCDコア		○	○	○	○	○	○
コア観察		○	○	○	○	○	○
着色した敷モルタルの範囲		○			○		
圧縮強度試験	にコア分けをした上部試験と下部	○	○	○	○	○	○
単位容積質量測定		○	○	○	○	○	○
静弾性係数測定		○	○	○	○	○	○
超音波伝播速度測定 (鉛直方向を測定)		○	○	○	○	○	○
超音波伝播速度測定 (直径方向を測定)		-	-	○	-	○	-
X線CT法		-	-	○	-	○	-

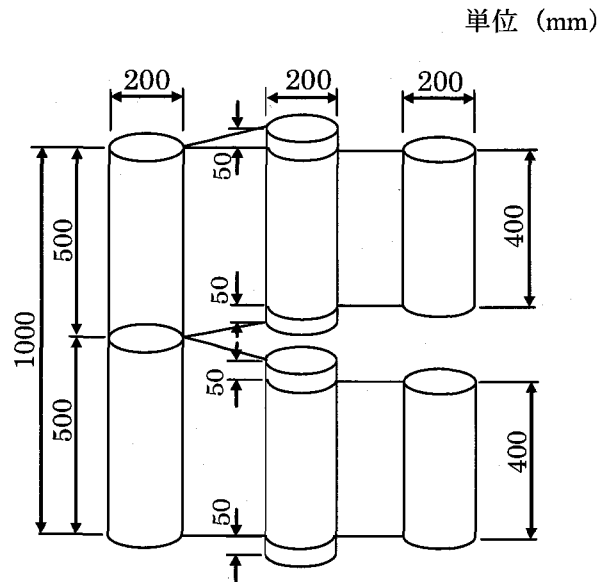


図-6.14 上部と下部の切断方法

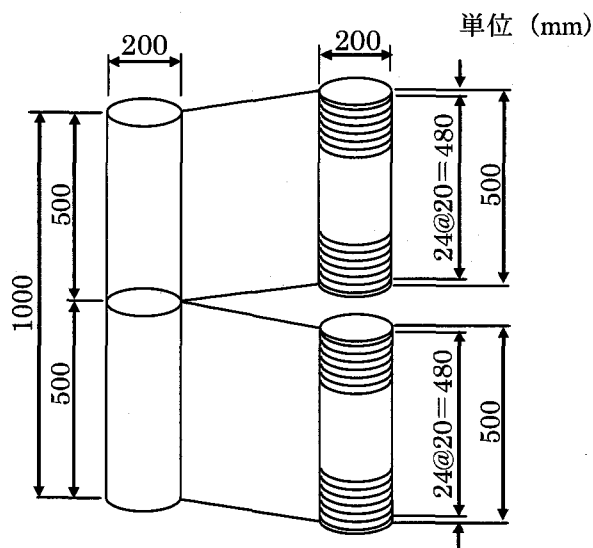


図-6.15 X線 CT 撮影および超音波伝播速度の測定位置

6.3.4 物理試験結果

(1) コア観察

RCD 工法技術指針 (案)¹⁰⁾には、打ち込み後の RCD の品質管理として、表-6.9 に示すようにコア供試体を評価する指標が記述されている。コア観察による評価の結果、試験施工で採取された各 6 本の供試体は全体にわたって表中の「良 (A)」の区分となり、圧縮強度に影響を与えるようなジャンカなどの欠陥は認められなかった。従って、採取されたすべての供試体については、外観上粗骨材の分離や締固め不足はなく、良好に施工されたといえる。図-6.16 に RCD 供試体の外観の一例 (A-3 上部) を示す。

表-6.9 コアの概観評価の例¹⁰⁾

区分	コアの概観評価	評価点
良 (A)	表面が緻密で通常のダムコンクリートに比べてさほどそん色がない部分	5
ほぼ良 (B)	表面がややポーラスな部分、砂分が少し現れている部分	4
やや良 (C)	表面がポーラス部分、モルタルがやや剥げ落ちている部分	3
不良 (D)	モルタルが粗骨材の周りにゆきわたっておらず、豆板状になっている部分	2
きわめて不良 (E)	粗骨材がバラバラな部分、またはモルタルが大きく欠損していてコンクリートコアの概観をなしていない部分	1



図-6.16 RCD のコア供試体の一例 (A-3 上部)

(2) 敷モルタルの影響範囲

敷モルタルの影響範囲を測定するために、赤色に着色した敷モルタルを使用して試験施工を行った。試験は転圧回数 16 回のケース A と転圧回数 12 回のケース B において、各 3 本ずつの供試体採取して打継モルタルの上昇量を測定した。打継モルタルの上昇量を表-6.10 に示す。各ケースの供試体 3 本の敷モルタルの上昇量は最大箇所では 80.3mm、平均で 25.6mm であった。

試験結果より、モルタルの影響範囲は平均では約 26mm であるが、最大上昇量の平均値は 50mm 程度であり、この範囲ではモルタルの影響を受けることが考えられる。下部の 50mm はカットしていることから、上部と下部に分けた強度試験などの結果にはほとんど影響を与えていないと言える。

表-6.10 敷モルタルの上昇量

No.	転圧回数 (回)	平均 (mm)	最大値 (mm)	標準偏差 (mm)
a-1	16	38.1	80.3	14.2
a-2	16	13.4	28.3	5.9
a-3	16	25.0	58.5	10.9
	平均	25.5	55.7	10.3
b-1	12	13.1	32.7	6.5
b-2	12	27.4	62.8	17.9
b-3	12	36.7	72.9	11.9
	平均	25.7	56.1	12.1

(3) 圧縮強度，単位容積質量，静弾性係数，超音波播速度（鉛直方向）

長さ 1m の供試体を上部と下部に分けた円柱供試体について、圧縮強度，単位容積質量測定，静弾性係数測定，超音波伝播速度測定（鉛直方向を測定）の試験結果を図-6.17～図-6.20 に示す。縦軸は深さを示しており、上部・下部それぞれの値をプロットしている。

1) 圧縮強度

RCD 供試体の上部の円柱供試体と下部の円柱供試体における全体の平均強度に対する圧縮強度の比を図-6.17 に示す。全ての供試体について上部の強度が下部よりも小さいという「上弱下強」の現象が確認された。下部に対する上部の圧縮強度の比は、ケース A では 77～83%，ケース B では 62～74%である。転圧回数が 16 回と多い方が、強度の差が少ない結果であったが、その差は僅かであり、転圧回数による違いはほとんどないと言える。

2) 単位容積質量

各供試体の上部と下部における単位容積質量を図-6.18 に示す。ケース B では上部の方が大きい供試体が 1 本あるが、残りの全ての供試体については 1～2%ではあるが下部の方が大きい。

また、転圧回数の多いケース A の単位容積質量はケース B よりも大きい傾向であるが、その差はわずかであり、転圧回数による違いはほとんどないと言える。

3) 静弾性係数

圧縮強度試験時にひずみゲージを設置して、ひずみを測定することにより静弾性係数を求めた。供試体の上部と下部における静弾性係数を図-6.19 に示す。ケース A では上部の静弾性係数の方が大きいケースが 1 ケースあるが、残りの供試体は全てについて、上部で下部より静弾性係数が小さい値であった。

4) 超音波伝播速度

供試体供試体を上部と下部に分けた各円柱供試体について、高さ方向の超音波伝播速度の測定結果を図-6.20 に示す。ケース A, B とともに上部で下部より超音波伝播速度が小さい結果であった。上部、下部ともに転圧回数の多いケース A の方が大きい傾向であり、単位容積質量の結果と同様な傾向であった。

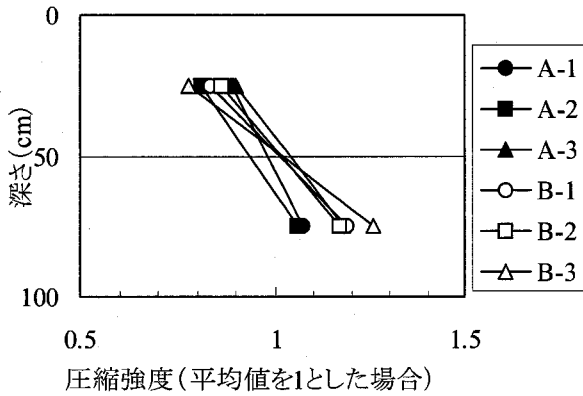


図-6.17 圧縮強度

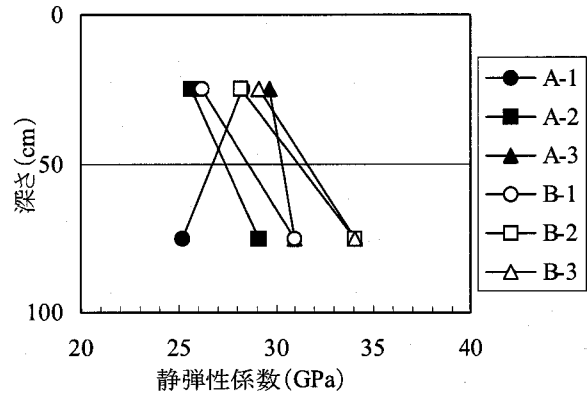


図-6.18 静弾性係数

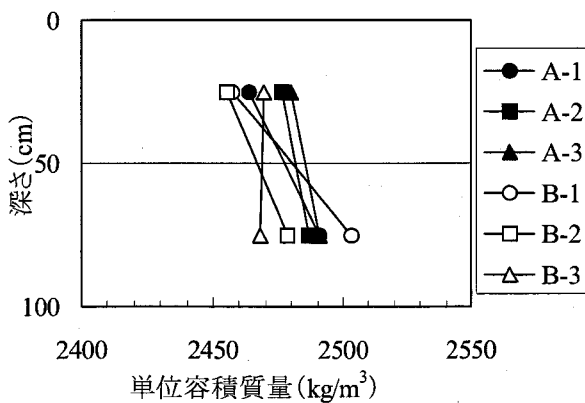


図-6.19 単位容積質量

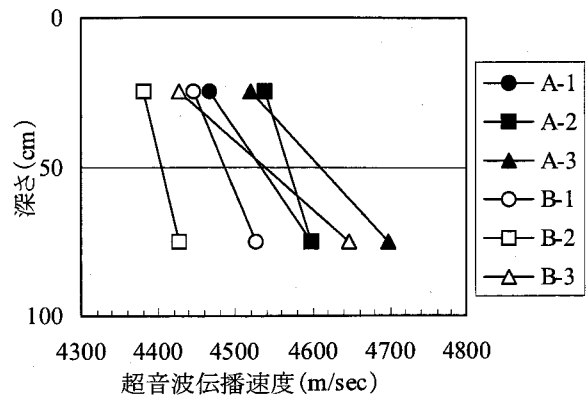


図-6.20 超音波伝播速度

(4) 超音波伝播速度 (直径方向)

1m の供試体について、図-6.15 に示す位置で直径方向に測定した超音波伝播速度の分布を図-6.21 に示す。供試体 A-3, B-2 とともに、上部から 10cm 程度のところまでの部分で超音波伝播速度が小さく、下部についても 10cm 程度のところまでの部分で超音波伝播速度が大きい。それ以外の中間部はばらついているもののほぼ均等に分布していることがわかる。

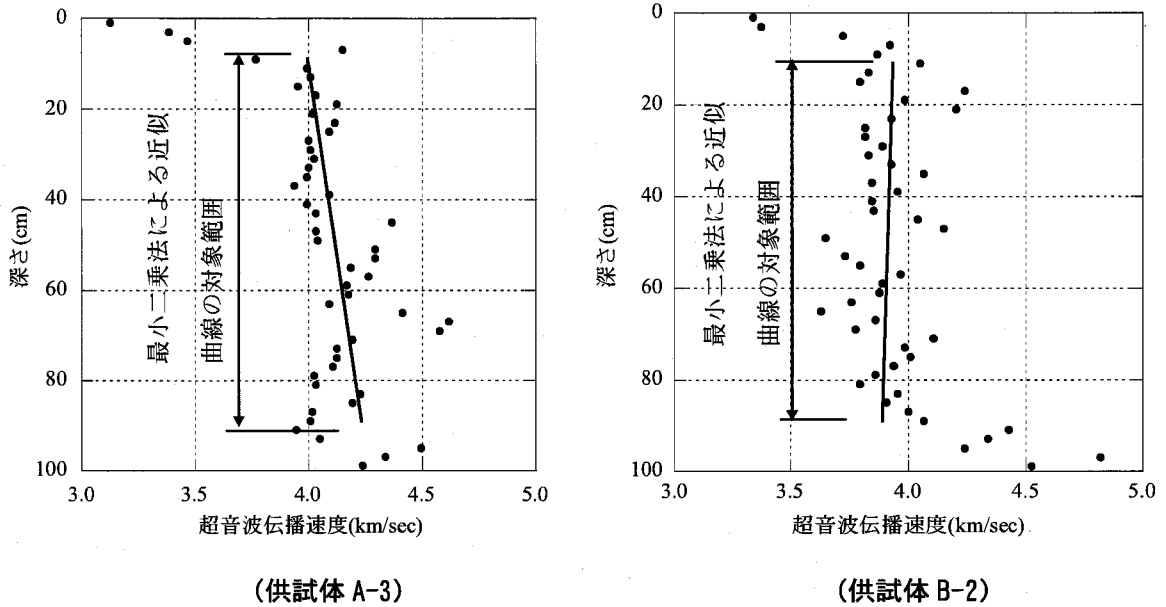


図-6.21 超音波伝播速度の分布

6. 3. 5 X線CT法による構造特性評価

(1) 装置と撮影方法

撮影に用いたX線CTスキャナは、X線管電圧400kV、管電流2Aであり、通過するX線のスライス厚は2mm、撮影領域は30cm×30cmとした。X線管と176個の検出器は同一水平面上に固定されており、上下方向に移動する。一方、供試体はターンテーブルの上に設置され、必要な併進と回転を行う。X線CTスキャナにより得られた撮影画像は30cm×30cmの撮影領域に対して512×512のピクセルで構成されることから1つのピクセルは1辺が約0.6mmの解像度となる。ただし、スライス厚が2mmで設定されているため、各ピクセルは断面の2mmの平均を表わしている。撮影した供試体は表-6. 8に示したA-3およびB-2の供試体である。

(2) 撮影画像

X線CTスキャナにより撮影されたA-3の供試体の画像の一部を図-6. 22に示す。各画像は上端から1cm（最上部）、25cm（上部の中心部）、75cm（下部の中心部）、99cm（最下部）の位置における撮影断面の画像である。円形の白い部分が供試体断面であり、その周りの黒い部分は空気である。また、試料内部の白い部分が骨材であり、灰色部分がモルタル、さらに黒い部分が空隙である。密度が高い物質ほどX線吸収率が大きく、画像では白く表示される。A-3の供試体の鉛直方法の全てのCT画像を付録-4（巻末資料）に示す。

ケースA-3の最上部では、粗骨材の輪郭が鮮明に写し出されているのが確認できる。灰色のモルタル部分を見てみると、上部から下部に移るに従って、モルタル部が全体的に白い傾向に変化していることがわかる。これはモルタル部の密度が上部よりも下部で大きくなっているためと考えられる。モルタルの密度に変化が見られるのは、水の移動による可能性がある。

また、最下部ではモルタルを示す部分が白くなり、粗骨材の輪郭が不鮮明になっていることがわかる。前述した敷モルタルの影響を受ける下から約50mmの範囲では、水結合材比の大きい敷モルタルの影響を受けてモルタル部の密度が大きくなり、CT値も高くなる。その結果、最下部の画像ではモルタル部が白く写っていると考えられる。

さらに、画像中には空隙を示す黒い箇所が確認できるが、上部から下部に移るに従って、黒い箇所が減少している傾向が確認できる。このことから、空隙が上部に多く存在することを示唆している。

最下部ではこの黒い箇所はほとんど確認できないが、これは敷モルタルの効果によって、目視で確認できる大きい空隙がなくなったためと考えられる。

また、上部から25cmの白く囲んだ箇所は後述する骨材周辺の空隙を示したものである。

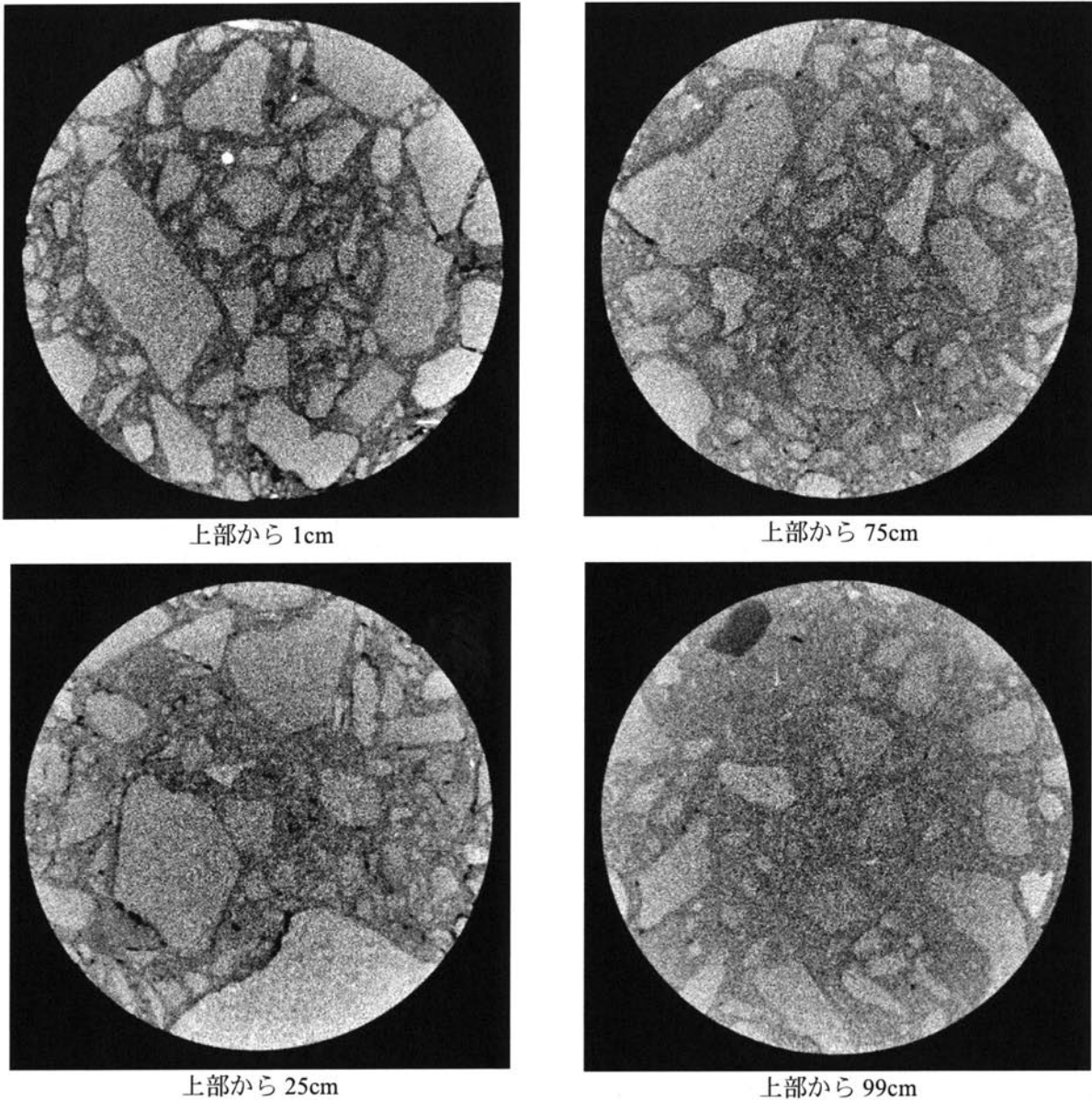


図-6.22 撮影画像の一例 (A-3のコア供試体)

(3) 粗骨材部とモルタル、空隙部の二値化

図-6.22 に示した撮影画像のうち、供試体 A-3 の最上部の供試体内の CT 値の頻度分布を図-6.23 に示す。横軸に CT 値、縦軸に頻度を示している。目視による CT 画像の観察を行うと、CT 値の高い順に、白い部分を粗骨材、灰色の部分をモルタル、黒い部分を空隙と分けることができる。しかし、図-6.23 に示した CT 値の頻度分布では正規分布に近い形状となっており、各材料の境界部分では特徴点が見出せない。全断面においてこのような傾向であったため、元画像において粗骨材とそれ以外のモルタルおよび空隙の二値化を試みた。原画像において粗骨材とモルタル境界部分が画像処理ソフトにより処理できるほど鮮明でないため、手書きによる二値化^{11), 12)}を行った。

まず、CT 画像を市販の画像処理ソフトにより粗骨材とそれ以外の部分の境界線がより明瞭に

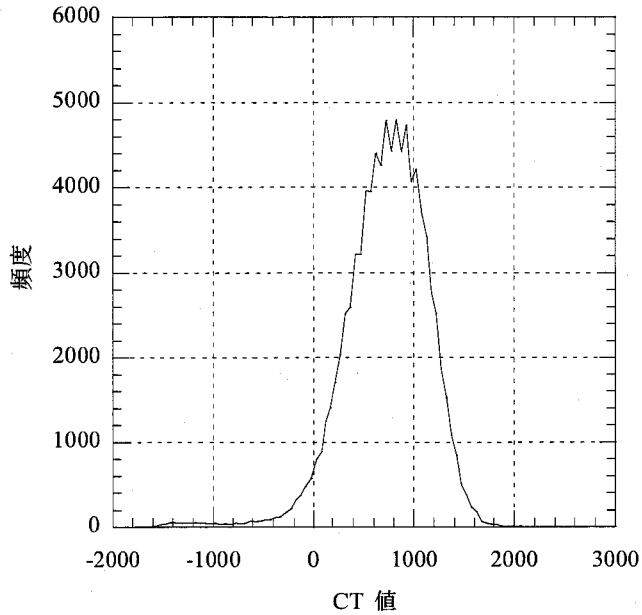


図-6.23 CT値の頻度分布

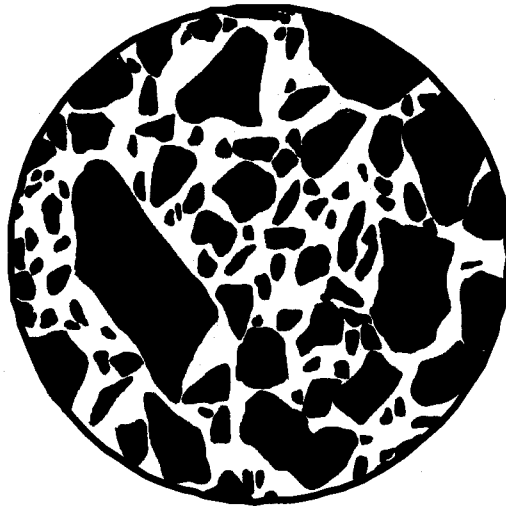


図-6.24 二値化画像

なるように画像処理し、その画像をプリントアウトする。プリントアウトした画像をトレーシングペーパーと重ね、境界線をマジックでトレーシングペーパー上に描く。このとき目視で直径5mm以上と思われる骨材を粗骨材と判定した。次にトレーシングペーパーに描かれた画像をスキャナでコンピュータに取り込み、画像処理をして境界線に囲まれた粗骨材部分を黒く塗りつぶすことにより、図-6.24に示す二値化画像を得た。

二値化画像において、供試体全断面積に対する黒い部分の面積の比を粗骨材が占める割合を示すものと考え、骨材率と定義した。粗骨材の単位体積質量はモルタルのそれに比較して大きい

で、CT 値も大きい。すなわち、図-6.23 に示す CT 値の頻度分布において、CT 値の高い部分に粗骨材の CT 値が分布していることになる。そこで、CT 値の頻度分布の総面積に対する粗骨材率に相当する部分を粗骨材の占める頻度分布とし、各断面の粗骨材の平均 CT 値を求めた。供試体 A-3 の粗骨材の平均 CT 値は 925~1021 であり、平均で 977、供試体 B-2 では 925~1053 であり、平均で 962 であった。理論的には粗骨材の CT 値は同じと考え、各断面の粗骨材の平均 CT 値を供試体 A-3 では 977、供試体 B-2 では 962 となるように、頻度分布を平行移動する補正を行った。

一方、空気の CT 値は $K=1000$ とした本研究の場合には -1000 であるが、空隙とモルタルの境界付近の CT 値は双方の影響を受けてしまうため、境界を正確に定義することはできない。ここでは、水の CT 値が 0 であることを考慮して、CT 値が 0 以下のピクセルを空隙とみなして、空隙の面積が頻度分布全体の面積に占める割合を空隙率と定義した。

上記を図-12 の頻度分布曲線に重ねて描くと図-6.25 のようである。

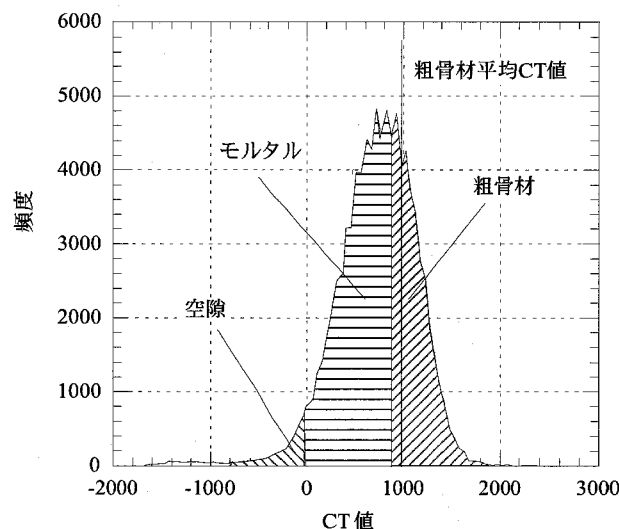


図-6.25 CT 値の頻度分布における粗骨材、モルタルおよび空隙の定義

(4) 粗骨材の鉛直分布

各供試体 A-3, B-2 における深さと骨材率の関係を図-6.26 に示す。供試体 B-2 において上部の骨材率が下部より若干小さい傾向が認められたものの、全体的には偏りがなく狭い範囲でばらついていることがわかる。このことは、ブルドーザによる敷均しや振動ローラによる転圧により、粗骨材が分離・集中することなく満遍なく分布して施工されていることを示唆していると考えられる。示方配合より求まる理論上の粗骨材の容積率は 59% であるが、供試体 A および B の粗骨材率の平均値はそれぞれ 56% および 55% であった。これは、理論容積の 93~95% の値を示して

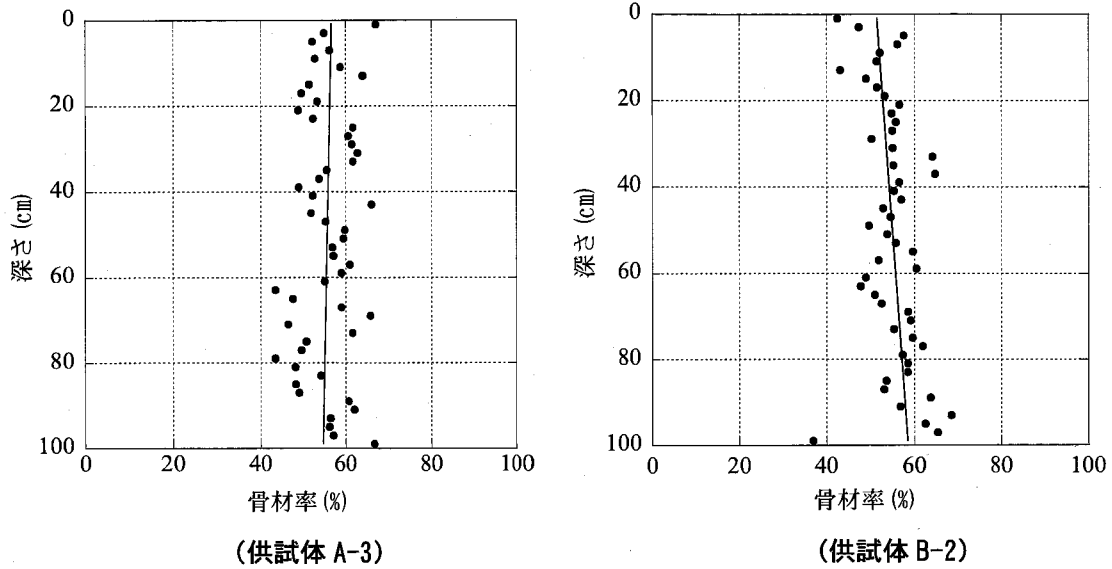


図-6.26 骨材率の分布

いることになる。2次元画像による評価が理論容積率と一致しない原因として、大きな粗骨材の影響を受けていることなどが考えられるが、20mm 間隔で断面撮影を行い、撮影枚数を極力多くすることにより、これらの影響を排除し、骨材の容積率をほぼ正しく評価できたと考えられる。

(5) 空隙の分布

1) 空隙の鉛直分布

各供試体 A-3, B-2 について深さ方向の空隙率の分布を図-6.27 に示す。空隙が占める率は転圧回数の差に関わらず2~4%, 平均で3%程度であることがわかる。

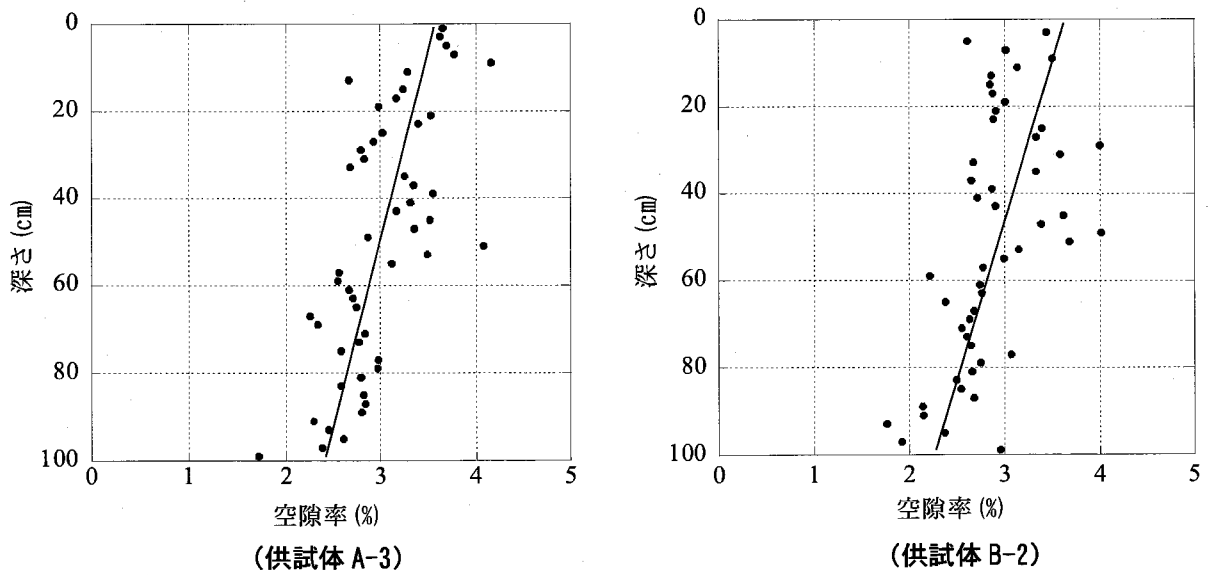


図-6.27 空隙率の分布

また、空隙率は上部の方ほどその割合が多くなっている。転圧時の振動締固めにより、空隙が下部から上部に移動しながら RCD 用コンクリートの充填率が増加する現象が起きていると推察される。

2) 空隙の位置と形状

1m の長さの供試体の 50 断面の画像の中には、2 つの種類の空隙が確認された。ひとつはモルタル内に見える小さく丸い空隙であり、もうひとつは、粗骨材周辺に存在する空隙である。図-6.28 は供試体 A-3 の上端から 9cm の断面画像であり、粗骨材周辺に存在する空隙の典型的な一例である。同じような空隙が図-6.23 に示す供試体 A-3 の上部から 25cm の画像部でも同様の空隙の存在が認められている。このような粗骨材周辺の空隙は、供試体内に存在する連続した空間となるため、コンクリートの圧縮強度を低下させる要因の一つとなる。

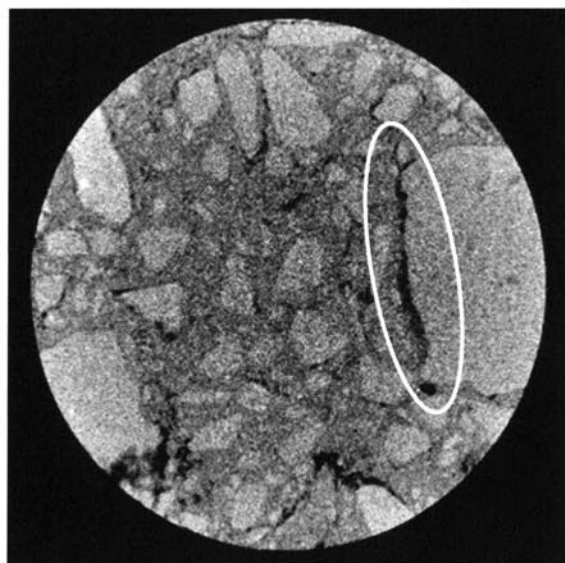


図-6.28 上部から 9cm の断面 (供試体 A-3)

(6) モルタル CT 値の鉛直分布

モルタル部の CT 値は密度と関係があることから、モルタルの CT 値を分析することによって、モルタルの密度の分布を求めることができる。モルタルの密度が変化する要因としては、ブリーディングによる水の移動が考えられる。ブリーディングが起きている場合には、水が上部へ移動するために、水結合材比が上部で大きくなる。

そこで、RCD 用コンクリートと同じ砂、結合材を用いて水結合材比の異なるモルタル供試体を作製し、これらの X 線 CT 撮影を行い、その平均 CT 値を求めた。モルタルの配合を表-6.11

に示す。平均 CT 値はモルタル供試体の中心付近の直径 3.6cm の CT 値の平均値とした。

得られたモルタルの平均 CT 値と水結合材比の関係を図-6.29 に示す。図は水結合材比が大きいモルタルはその平均 CT 値が小さいことを示している。これは水結合材比の大きいモルタルはその密度が小さいためであると考えられる。図-6.29 で得られたモルタルの平均 CT 値と水結合材比の関係から、供試体の各断面のモルタルの平均 CT 値から見かけの水結合材比を推定した。各供試体 A-3, B-2 について各断面での推定水結合材比の分布を図-6.30 に示す。転圧回数が 16 回のケース A-3 では推定水結合材比は上部で大きく、下部で小さいことが顕著であり、ブリーディングにより水が上部に移動している可能性があることが推察できる。一方、転圧回数が 12 回のケース B-2 でも傾きはわずかであるが同じような傾向を示した。

表-6.11 モルタル供試体の配合

W/ (C+F)	s/a	単位量 (kg/m ³)				単位容 積質量	平均 CT値
(%)	(%)	W	C	F	S	(kg/m ³)	
40	30	219	383	164	1550	2316	652
80	30	234	205	88	1751	2278	546
100	30	237	166	71	1797	2271	493
110	30	237	151	65	1817	2270	450

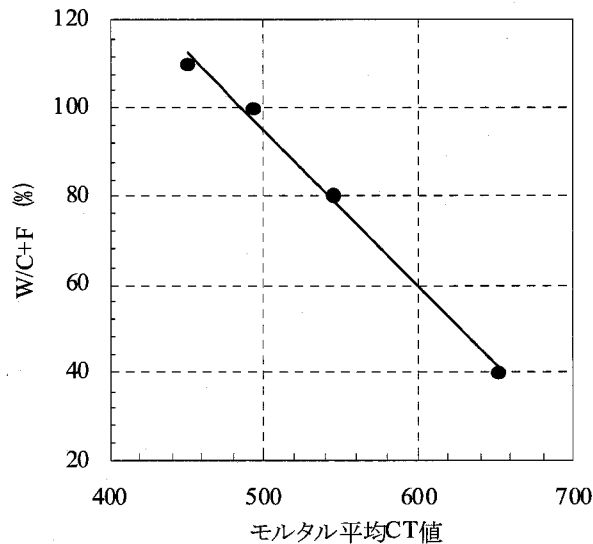


図-6.29 モルタルの平均 CT 値と水結合材比

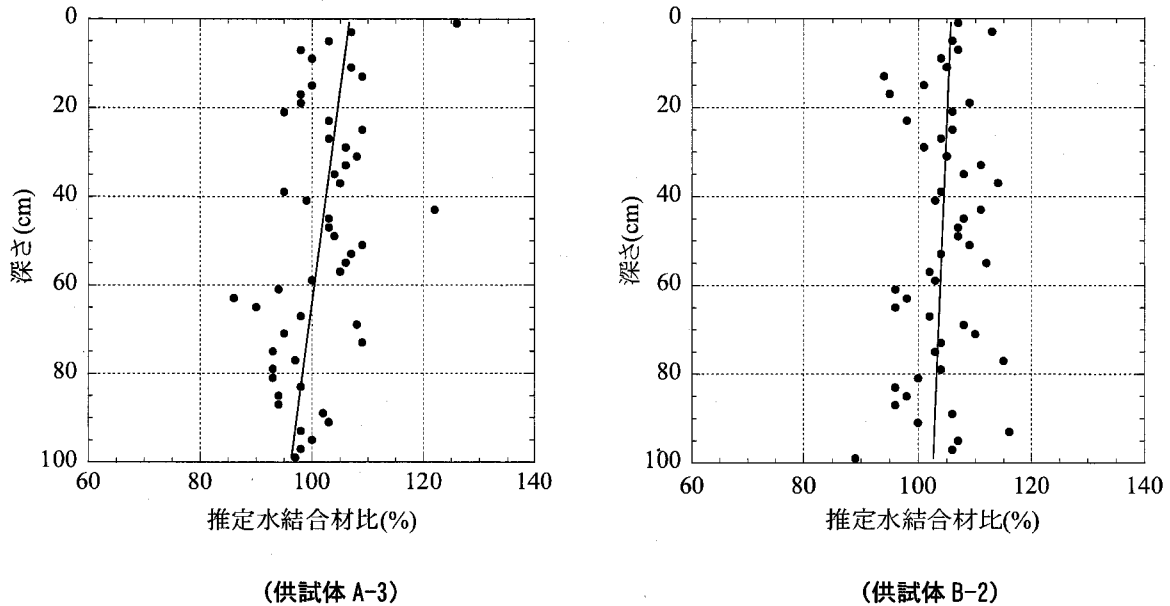


図-6.30 推定水結合材比の分布

6.3.6 強度分布に関する考察

(1) 試験結果の概要

実施した試験についての結果と考察のまとめを表-6.12に示す。

コア観察の結果、ジャンカなどの欠陥は確認できなかったことから、締固めなどの施工は良好に実施されたと言える。

また、敷モルタルの影響は下部の約 50mm が影響範囲であった。この部分については、直径方向の超音波伝播速度も大きい結果が得られており、敷モルタルの影響で空隙が少なくなっていることが考えられる。上部と下部に分けた圧縮強度試験や単位容積質量、静弾性係数および超音波伝播速度の試験においては、この敷モルタルの部分をカットしていることから供試体の上部と下部で強度に偏りがあつたことには関係しない。

今回は転圧回数の異なる供試体を用いて試験を行ったが、単位容積質量と超音波伝播速度の試験結果に基づくと、転圧回数の多いケース A で単位容積質量と超音波伝播速度が大きいことが確認された。供試体の単位容積質量が大きくなる原因としては、粗骨材占める割合、モルタルの単位容積質量の相違、空隙の占める割合などの相違が考えられる。これらの原因はいずれも超音波伝播速度が大きくなる要因と考えられるが、その差はわずかであり、転圧回数による影響とは考えにくい。

表-6.12 試験結果と考察の概要

試験施工の試験ケース		ケースA 転圧回数16回	ケースB 転圧回数12回	考察		
コア試験 上部と下部に分	圧縮強度試験	上弱下強		空隙の影響が大きい（ブリーディングによる水の移動や敷モルタルも多少は影響している）		
	単位容積質量測定	上小下大		空隙の影響が大（粗骨材はほぼ均等であり、ブリーディングによる水の移動もB-2ではほとんどない）		
	静弾性係数測定	上小下大		空隙の影響が大（粗骨材はほぼ均等であり、ブリーディングによる水の移動もB-2ではほとんどない）		
	超音波伝播速度測定 （鉛直方向を測定）	上小下大		空隙の影響が大（粗骨材はほぼ均等であり、ブリーディングによる水の移動もB-2ではほとんどない）		
1mのコア全体に対する試験	コア観察	良好		施工上の不具合（強度に大きな影響を与えるジャンカや材料分離など）はない		
	X線CT法	骨材分布	ほぼ均等	若干上部が小	粗骨材の分離はほとんどない	
		空隙	量	上大下小		強度、単位容積質量、静弾性係数、超音波伝播速度に影響を与えている
			形状	上部で粗骨材周辺の空隙が顕著		強度、静弾性係数、超音波伝播速度に影響を与えている
		見かけの水セメント比	上大下小	若干上部が大	転圧回数が多いとブリーディングする可能性がある 強度試験に大きな影響を与えるほどではない	
	超音波伝播速度測定 （直径方向を測定）	上小下大（上部から10cmで特に小さく、下部から10cmで特に大きい）		空隙の影響が大（粗骨材はほぼ均等であり、ブリーディングによる水の移動もB-2ではほとんどない）		
	着色した敷モルタルの範囲	下部から平均26mm、最大80mmが影響範囲		上部と下部（50mm）を切断したため、強度試験結果には影響は少ない		

（2）上部の強度が下部より小さくなる要因

今回の RCD の試験施工では、上部の強度が下部より小さい「上弱下強」となる傾向が確認された。上部の圧縮強度は下部よりも 20～30% 程度減少していた。圧縮強度測定時に実施した静弾性係数試験の結果や超音波伝播速度試験の結果でも上部で小さく、上部の強度が小さいことを示している。

これらの物性試験の結果について考えられる要因としては、敷均し時における粗骨材の分離や、転圧時におけるモルタル部のブリーディングによって、水や空隙の分布が偏ったことなどが考えられる。このうち、粗骨材の分布については、X線CT法によって均等な分布が確認できたことから、今回の強度分布が生じた直接の原因ではないと言える。

以下に、X線CT法や直径方向の超音波伝播速度の測定によって得られた試験結果より、空隙、モルタルの分布に分析を行い、強度分布の原因を考察する。

1) 空隙の分布

X線CT法で空隙の分布を分析した結果、上部で空隙が多く、下部で小さいということが明らかとなった。振動ローラによる転圧により、振動は上部から伝わることから上部ほど強い振動を受けて締固め易いといえる。ところが、強い振動によりブリーディングが発生すると、上部に空隙が増加して強度が小さくなることも考えられる。

しかし、一般に空隙量1%の増加につき圧縮強度は4~6%程度減少するといわれており¹³⁾、本ケースでは圧縮強度で20~30%程度減少していることから、空気量の相違のみが強度分布を生じる原因であるとは考えにくい。

一方、X線CT撮影による断層画像を観察した結果から、供試体の上部において、粗骨材周辺に空隙が存在することが確認された。空隙は骨材の周辺で連続しており、このような空隙が上部に存在していたことは上部で強度の小さいことと深い関係があると考えられる。

また、直径方向を測定した超音波伝播速度の鉛直分布では、リフト上部の約10cmについて、超音波伝播速度の小さい部分があった。この理由については、振動ローラの影響を強く受けるため、振動によって水や空隙が上部に移動してきたと考えられるが、振動ローラが通過する際に骨材が動いたことにより、上述したような骨材周辺の空隙が発生したことも考えられる。

2) モルタルの平均CT値の分布

X線CT法によって、モルタルのCT値の分布から見かけの水結合材比の分布を検討した。転圧回数が16回の供試体では、水の移動によりモルタルの平均CT値が偏って分布しており、上部下部で10%程度の見かけの水結合材比の相違があると推察された。このことは、強度分布に影響を与えると考えられる。

しかし、転圧回数12回の供試体では上部と下部の見かけの水結合材比の相違がわずかであるにも関わらず、強度に顕著な差があったことから、このような水の移動による見かけの水結合材比の分布が強度分布に与える影響は少ないと考えられる。

3) 要因に関するまとめ

以上の結果を総合すると、鉛直方向の強度分布に偏りが生じた事に関して最も関係が深いと考えられる要因は、上部で発生している粗骨材の周辺に生じた空隙にあるといえる。この空隙の存在によって、粗骨材の周辺には連続した空間が存在することとなり、上部と下部で強度の分布が偏る傾向になったと考えられる。このような粗骨材周辺の空隙発生の要因は明らかではないが、材料や施工方法などの条件によって異なることが考えられる。

6. 3. 7 まとめ

RCD工法におけるリフト内鉛直方向の物性分布を評価することを目的として、施工後のRCDから採取した供試体にX線CT法を適用し、圧縮強度試験や超音波伝播速度測定などの物理試験結果と比較しながら検討を行った。

まず、物理試験の結果からは、次のような結果を得た。

(1) 圧縮強度試験によると、上部の圧縮強度が下部のそれより20~30%程度小さい「上弱下強」

となる傾向が確認できた。

- (2) 静弾性係数試験や超音波伝播速度試験の結果でも同様に上部で静弾性係数及び伝播速度の値が小さいことが確認された。

次に、供試体に対して X 線 CT 法を適用し、RCD 用コンクリートの深さ方向の物理的諸特性である骨材の分布や空隙の分布などを検討し、次のような結果を得た。

- (3) 深さ方向の粗骨材分布は、ほぼ一様であることが明らかになった。X 線 CT 法による骨材率は示方配合で示される理論容積に対して 93~95%であった。
- (4) 供試体内部の空隙の分布を調査した結果、転圧回数に差に関わらず、空隙の分布率は 2~4%程度であり、上部に空隙が多く分布する傾向が確認された。また、供試体下部に比較して上部の骨材周辺に空隙が多く存在していることが確認された。これらの空隙量の分布および上部に存在する骨材周辺の空隙が、強度分布に大きな影響を与えたと考えられる。
- (5) モルタルの平均 CT 値を分析した結果、転圧回数が 16 回の供試体の上部で見かけの水結合材比が大きいことが明らかとなった。これはブリーディングによる水の移動があったと考えられる。しかし、転圧回数 12 回の供試体ではこの移動はわずかであった。両供試体の上部と下部の強度の差は顕著であることを考慮すると、水の移動による見かけの水結合材比の分布が強度に与える影響は少ないと考えられる。

以上のように、供試体の X 線 CT 法による内部物性評価を行った結果と強度試験の結果から、RCD 工法で施工されたコンクリートの強度分布の偏在の主たる原因は粗骨材周辺の空隙にあると総合的に推論した。したがって、粗骨材周辺の空隙を極力少なくすることが RCD 工法における品質改善のための対策であると言える。これらの空隙の発生要因についてはさらなる調査検討が必要であると考えられるが、今後の改善策として、材料面では極端な凹凸のある骨材を使用しないことや適切な粒度分布の骨材を使用することなどが考えられる。また、施工面においては 1 層を 30cm 程度の厚さで薄層に敷均し、直ちに振動転圧を行う施工方法を検討することなどが考えられる。

本研究で用いた X 線 CT 法は、RCD 用コンクリート内の骨材や空隙の分布状況およびモルタルの平均 CT 値を定量的に分析することができ、それらの物性分布の評価に対して有効であることが明らかとなった。

また、構造物に打込まれたコンクリートの 1 リフト内の物性分布は、RCD 用コンクリート以外のコンクリートにおいても状況により偏りが生じることから、多様な種類のコンクリート構造物に対しても X 線 CT 法は適用できると言える。さらに、硬化コンクリートに限らず、硬化過程のフレッシュコンクリートのブリーディングの進行状況などの評価のために X 線 CT 法の適用も可能であろう。

6.4 橋梁コンクリートの施工評価

6.4.1 概説

鉄筋コンクリート橋梁などのコンクリートを用いる建設工事では、生コン工場からコンクリートを購入するのが一般的である。生コン工場では品質管理によって所定の規格を満足し、かつ均一な品質のコンクリートが出荷されているが、施工時には運搬から打込み、締固めに至るまでの工程において、コンクリートの品質を管理する必要がある。特に、配筋の密なコンクリート構造物では、狭隘部において均一かつ確実な締固めを行い、施工後のコンクリートの品質のばらつきを小さくするためには高い施工能力が必要とされる。

本節では、鉄道橋梁のコンクリート構造物から9本の供試体を採取し、X線CT法を用いて供試体の圧縮強度を推定し、施工によるコンクリートのばらつきを評価することを試みた。そして、実際に供試体の圧縮強度試験を実施し、X線CT法で推定した圧縮強度との比較を行った。













6.4.2 コンクリート供試体

コンクリート供試体は、次に示す9箇所から採取した直径45mmの円柱供試体を用い、X線CT撮影は各供試体10断面で行った。コンクリート供試体の外観を表-6.13に示す。

表-6.13 採取供試体の外観（次ページにつづく）

	断面	側面
No.1		
No.2		
No.3		

表-6.13 採取供試体の外観

	断面	側面
No.4		
No.5		
No.6		
No.7		
No.8		
No.9		

6.4.3 空隙率と骨材率¹⁴⁾

X線 CT装置による撮影画像の一例を図-6.31 に示す。また、全ての CT画像を付録-5 (巻末資料) に示す。まず、コンクリート供試体の空隙率および骨材率を求めた。図-6.31 (a) に示す撮影画像において、得られた X線 CT画像をフリーのソフトウェア「risa」を用いて BMP ファイルに変換した後、Adobe Photoshop の色調補正 (2 階調化) を行った。その際に、CT 原画像を参考に 2 枚の色調補正を作成した。すなわち、図-6.31 (b) に示す骨材の境界を鮮明化した画像と、図-6.31 (c) に示す空隙の境界を鮮明化した画像である。それらの境界を鮮明化するために適当なしきい値を定めた。次に、色調補正した二値化画像を、RGB カラーモードを選択して JPEG ファイルとして保存した。それを市販の画像処理ソフトウェア「Mac Scope」を用い、供試体の断面積に対する二値化された白あるいは黒の部分の面積比を求めた。その比は供試体の断面積に対する

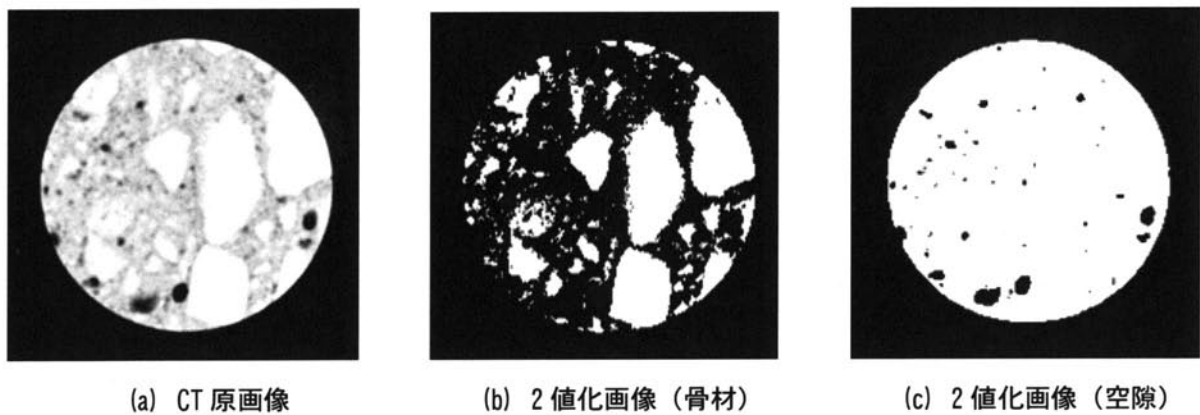


図-6.31 コンクリート供試体の断面画像

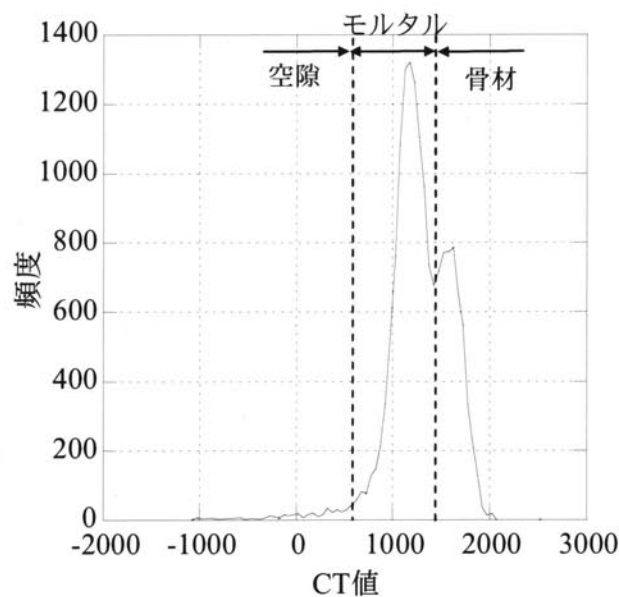


図-6.32 CT 値のヒストグラム

骨材あるいは空隙の面積率であり、前者を骨材率、後者を空隙率と呼ぶ。

次に、図-6.31(a)に示した撮影画像データを数値データに変換(OD変換)し、図-6.32に示すCT値の頻度分布を作成する。横軸にCT値、縦軸に頻度を示している。CT値頻度分布において、CT値の高いほうから骨材、モルタルおよび空隙が分布していると考えられる。ここでは、空隙部分のCT値は600以下の値とした。この値は、図-6.31(c)に示す空隙の二値化画像により評価された空隙率と頻度分布の総面積に対する空隙部分が占める面積の割合が同等になるようなCT値に設定した。これらの空隙率、骨材率の結果を図-6.33にまとめた。空隙率や骨材率は大きなばらつきや特に乖離した値もなく一様であり、品質上問題はないと考えられる。

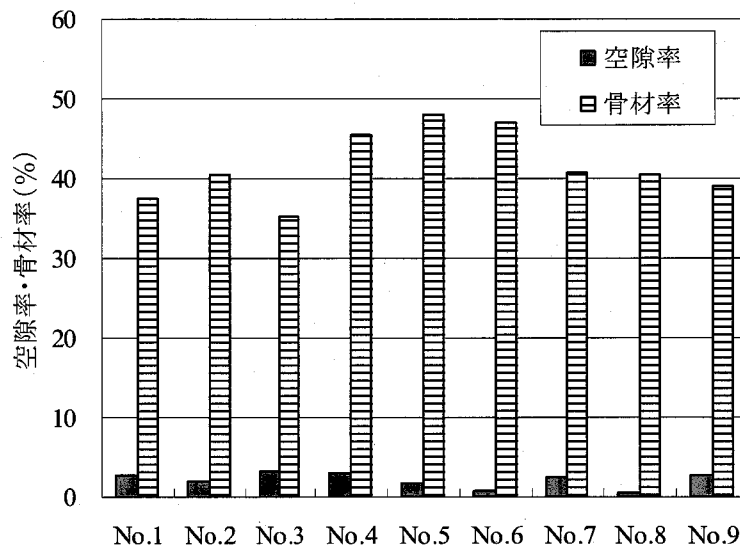


図-6.33 空隙率と骨材率

6.4.4 モルタル平均CT値¹⁴⁾

二値化画像により評価された骨材率は供試体の断面積に対する割合なので、図-6.32に示すように、CT値頻度分布の総面積に対する骨材および空隙分の面積を除いたモルタル部分のモルタル平均CT値を評価した。各供試体につき10断面のそれぞれのモルタル平均CT値を求め、それらを平均してそのコンクリート供試体のモルタル平均CT値とした。各供試体の直径は45mmであることから、第5章第2節の式(5.7)を用いて、供試体の直径125mmのときのCT値に修正して評価を行った。各供試体のモルタル平均CT値を図-3.34に示す。No.5, No.6, No.8の供試体が高いCT値を示していることがわかる。

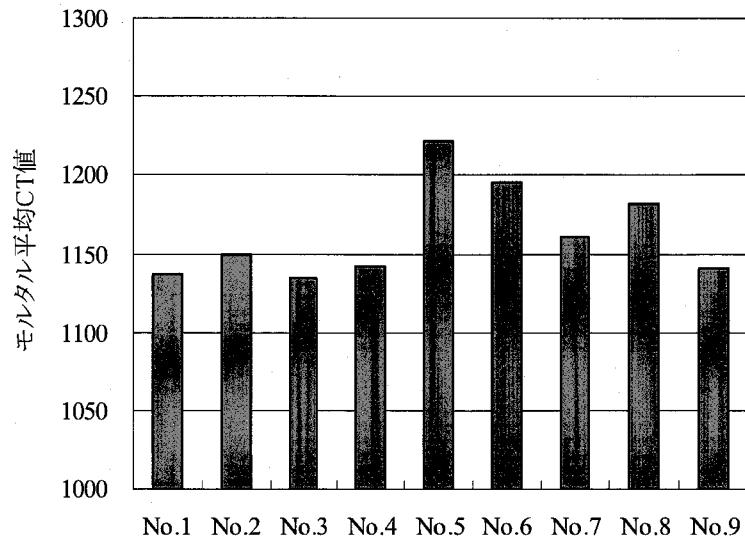


図-6.34 モルタル平均CT値

図-6.35 は各供試体のモルタル平均CT値とJIS A 1108による圧縮強度の関係をプロットしたものである。ばらつきはあるが、モルタル平均CT値が大きくなるとともに圧縮強度は大きくなり、相関があることが確認できる。特にモルタル平均CT値の大きいNo.5とNo.6は圧縮強度も大きかった。図には、第5章の室内作製コンクリートにおいて、図-5.22で示したモルタル平均CT値と材齢28日の圧縮強度 F_{28} の関係を挿入している。

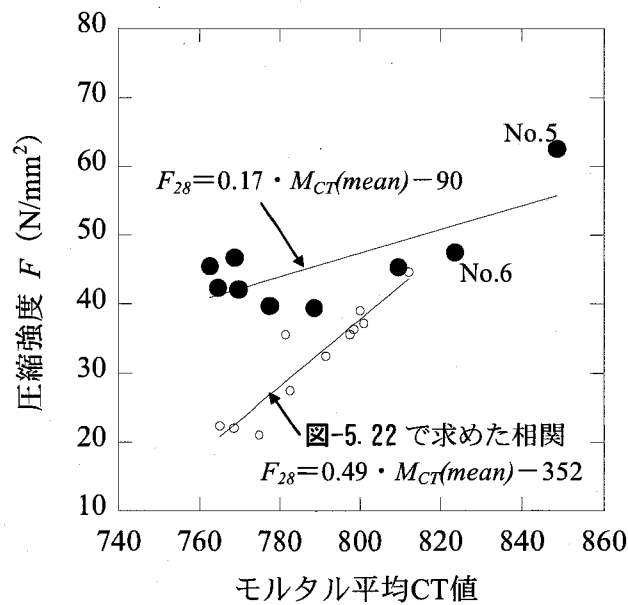


図-6.35 モルタル平均CT値と圧縮強度

モルタル平均 CT 値 M_{CT} (mean) - 圧縮強度の相関は、評価対象の橋梁コンクリートと図-5.22 で求めたものとは異なる相関であり、材齢や養生条件、使用材料などが大きくことなるコンクリートであったと考えられる。

そこで、図-6.35 に示した評価対象の橋梁コンクリート供試体の全てのデータについてモルタル平均 CT 値 M_{CT} (mean) と圧縮強度 F の関係から、最小二乗法を用いて線形近似を行った。得られたモルタル平均 CT 値による圧縮強度の推定近似式を (6.1) に示す。

$$F \text{ (N/mm}^2\text{)} = 0.17 \text{ (N/mm}^2\text{)} \cdot M_{CT} \text{ (mean)} - 90 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (6.1)$$

式 (6.1) を用いて、モルタル平均 CT 値から供試体の圧縮強度を予測し、実測値と比較した。比較の結果を図-6.36 に示す。図中には 5N/mm^2 乖離した線を 2 本の点線で示す。同図より、ほとんどのプロットが 5N/mm^2 以内の乖離で評価されており、圧縮強度の推定値 F は実測値に近いといえる。したがって、十分な本数の供試体を用いてモルタル平均 CT 値と圧縮強度のデータを採取し、最小二乗法によってモルタル平均 CT 値から圧縮強度を求める推定近似式を作成することにより、照査したい部分の供試体の圧縮強度を推定することが可能であるといえる。

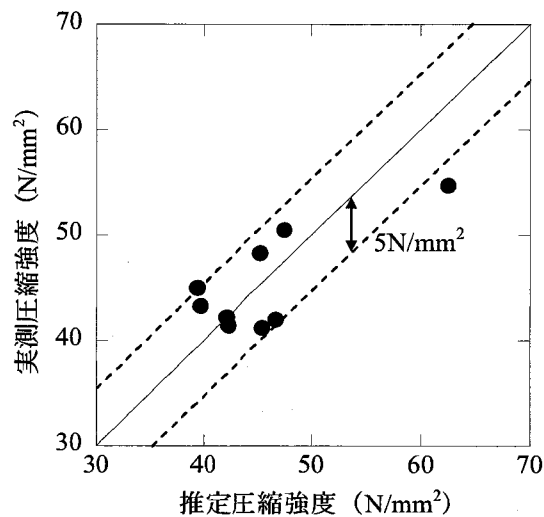


図-6.36 推定圧縮強度と実測圧縮強度

6.4.5 まとめ

鉄筋コンクリート構造物である橋梁から供試体を採取し、X線CT法を適用してコンクリートの品質確認を行い、施工による空隙率や骨材率のばらつきや圧縮強度などを検討した。

供試体の空隙率や骨材率を分析した結果では、供試体毎のばらつきは少なく、品質上問題と考えられる供試体はなかった。

次に、モルタル平均CT値を分析し、圧縮強度試験で得られた結果を用いて、モルタル平均CT値と圧縮強度の相関を検討した。この結果、供試体のモルタル平均CT値と圧縮強度には高い相関が認められ、モルタル平均CT値が大きい供試体は圧縮強度が大きいことが確認された。

さらに、9本の各供試体のモルタル平均CT値と圧縮強度の相関から圧縮強度の推定近似式を求め、供試体のモルタル平均CT値から圧縮強度を推定した。そして、推定圧縮強度と実測圧縮強度を比較した結果、推定圧縮強度は 5N/mm^2 以内の精度で圧縮強度を推定できることが明らかとなった。

6. 5 結言

本章では、コンクリートの施工時における品質評価に関する諸問題について X 線 CT 法を適用した事例について述べた。コンクリート構造物の診断にあつては、材料そのものの診断を行うとともに、施工方法や施工状況を評価することも重要である。

第2節では、コンクリート構造物コンクリートの施工上の最大の特徴のひとつであるコンクリートの経時変化について X 線 CT 法による検討を行った。また、経時変化に伴うブリーディングの影響を調査するために、X 線 CT 装置のスキヤノ撮影という機能を用いて、コンクリートの平面透過撮影を実施した。

モルタルの X 線 CT 撮影では打込み初期に CT 値が上昇するが、その上昇量はわずかであり、密度の変化を伴うようなものではないことがわかった。一方、コンクリートの経時変化試験では、ブリーディングの発生する範囲などが差画像を分析することで明らかになった。

第3節では、コンクリートダムにおいて近年の合理化施工の代表である RCD 工法について、現場から採取されたボーリングコア供試体に X 線 CT 法を適用し、材料や空隙の分布特性を明らかにするとともに、供試体を用いた物理特性と比較検討し、施工評価を行った。X 線 CT 法の適用によって懸念された骨材の分布状況やブリーディングの状況を定量的に確認することができた。また、空隙の特徴などが可視化によって明らかとなり、リフト内の物性の分布に与える影響などを考察することが可能となった。

第4節では、鉄筋コンクリート構造物を対象とし、施工されたコンクリート橋梁の数箇所から供試体をサンプリングし、供試体の空隙率や骨材率のばらつきを評価するとともに、供試体のモルタル平均 CT 値からコンクリートの圧縮強度を評価した。その結果、供試体のモルタル平均 CT 値は圧縮強度と高い相関にあることを確認し、得られた相関関係を用いれば、供試体のモルタル平均 CT 値から圧縮強度の推定が可能となったことが明らかとなった。

【参考文献】（第6章）

- 1) 伊藤剛, 天明敏行, 村上祐治, 尾原祐三, “X線CTスキャナによるモルタル硬化時の経時変化撮影”, 土木学会第62回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, 5-044, pp.87-88, 2007.9
- 2) 天明敏行, 伊藤剛, 尾原祐三, 村上祐治, “X線スキャノ撮影によるブリーディング現象の可視化”, 土木学会第62回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, 5-048, pp.95-96, 2007.9
- 3) 天明敏行, 尾原祐三, 堤知明, 村上祐治, “RCDコアのX線CT法による物性分布の評価”, 土木学会論文集, Vol.64, No.3, pp.248-260, 2008.7
- 4) T.Temmyo, Y.Obara, T.Tsutsumi, Y.Murakami, “Distribution of physical properties in Roller-Compacted Dam-Concrete cores analyzed by X-ray CT”, Symposium: Dam Safety Management, Role of State, Private Companies and Public in Designing, Constructing and Operating of Large Dams, ICOLD 75th Annual Meeting, 2007, pp.1-10
- 5) 天明敏行, 森田浩二, 菊地保旨, 村上祐治, 藤田司, 高橋博, “マレーシアのスンガイキンタダムにおけるRCCダムの施工技術”, 土木建設技術シンポジウム論文集, 土木学会, pp.163-170, 2007.8
- 6) 天明敏行, 菊地保旨, 村上祐治, 大矢道弘, “マレーシアのスンガイキンタダムで実施したRCCダムの配合設計と試験施工”, ダム工学, Vol15, No.4, pp.307-318, 2005.12
- 7) 松本憲佳, 坂田俊之, “RCD コンクリート工法による島地川ダム堤体の施工について”, 大ダム, No.96, pp.29-46, 1981.6.
- 8) 足立敏之, 白井加悦, “リフト厚 1m による玉川ダム RCD 工法の施工”, ダム技術, Vol.3-4, pp.67-74, 1985.
- 9) 國分正胤, “日本における RCD 工法によるコンクリートダム施工法の開発”, ダム技術, Vol.3 増刊 1, pp.1-15, 1985.
- 10) (財)国土開発技術研究センター編集, “RCD 工法技術指針”, p.47, 1989.8.
- 11) 天明敏行, 堤知明, 村上祐治, 尾原祐三, “X線CT法による超硬練りコンクリートの骨材分布と締固め特性”, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学協会, Vol.23, No.2, pp.1297-1302, 2001.7.
- 12) 天明敏行, 尾原祐三, 堤知明, 村上祐治, “X線CT法によるRCDコアの物理特性の分布”, 大ダム, 日本大ダム会議, No.203 (2008-4), pp.81-83, 2008.1
- 13) 岡田清, 六車熙: コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, p.339, 1981.
- 14) T.Temmyo, Y.Murakami, Y.Obara, “Evaluation of Water Cement Ratio of Hardened Concrete by X-ray CT Method”, Advances in X-ray Tomography for Geomaterials, pp.443-449, 2006.10