

# 論文 X線CT法による硬化コンクリートの特性評価

天明 敏行<sup>\*1</sup>・尾原 祐三<sup>\*2</sup>・堤 知明<sup>\*3</sup>・村上 祐治<sup>\*4</sup>

**要旨:** X線CT法を用いて硬化コンクリートの特性評価を行う場合、骨材、モルタル、空隙などに分けて、それぞれの比率や密度の情報を把握することが有効な手段となる。特にモルタルの密度に関する情報はコンクリートの特性の指標となる水セメント比や単位セメント量などに関係が深く、コンクリートの配合を推定できる可能性が考えられる。本研究では、適切なしきい値を設定する材料構成定量化法を用いてコンクリート中のモルタル部分のX線吸収率を示すCT値を分析することにより、水セメント比や単位セメント量の相違が判別可能なことを示し、X線CT法による硬化コンクリートの物性評価の有効性を示した。

**キーワード:** X線CT法, CT値, 材料構成定量化法, 配合推定

## 1. はじめに

X線CT (Computer Tomography) 法とは、X線を用いたコンピュータ断層画像法であり、非破壊での物体内部の状況観察に有効利用されている。X線CT法をコンクリート供試体に適用した場合には、骨材や空隙、モルタルの占める比率や密度などの定量的な情報が得られることから、これを用いた配合推定などが期待できる。

本研究では、X線CT法を用いた硬化コンクリートの特性評価を行う目的で、試験室内で作製した、水セメント比や細骨材率の異なるコンクリート供試体について、X線CT法を適用した。

## 2. X線CT法

コンクリート円柱供試体のX線CT画像の例を図-1に示す。画像の各ピクセルにはX線吸収率を表すCT値が与えられており、CT値は以下の式(1)で定義される。

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

ここで、 $\mu_t$ は求める点のX線吸収係数、 $\mu_w$ は水の吸収係数で-1である。 $K$ は任意に設定できる係数であり、本研究では $K=1000$ とした。この場合、空気のX線吸収係数は0であるからCT値は-1000となる。また、水のCT値は0となる。X線吸収係数は物体の密度にほぼ比例するため、CT値も密度に比例した値となる。

X線CT法によりコンクリートの各材料の構成、すなわち骨材やモルタルの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。筆者らは、X線CT法のコンクリートの診断に適用するための研究において、材料の境界CT値を評価する方法とし

て、材料構成定量化法<sup>1)</sup>を提案した。

材料構成定量化法では、まず使用する産業用X線CT装置の分解能を考慮してコンクリートを比較的大きな骨材(ここでは骨材と呼ぶ)、比較的小さな骨材を含むセメントペースト(ここではモルタルと呼ぶ)、比較的大きな空隙(ここでは空隙と呼ぶ)に分ける。そして、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標本(ファントム)を用いてしきい値を決定する。この方法により、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。

図-1の画像に対して、材料構成定量化法を用いて得られたしきい値を供試体部のCT値の頻度分布図に示したものを図-2に、空隙と骨材を2値化したものを図-3にそれぞれ示す。

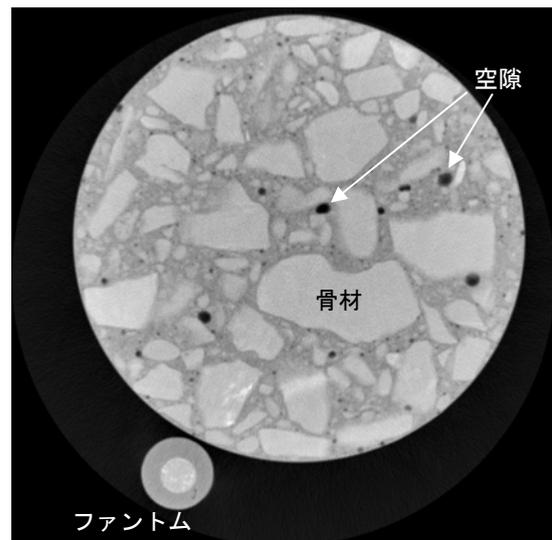


図-1 X線CT画像

\*1 (株)間組 土木事業本部技術第三部 工博(正会員)

\*2 熊本大学大学院 自然科学研究科教授 工博

\*3 東京電力(株)電力技術研究所 工博(正会員)

\*4 (株)間組 技術環境本部 工博(正会員)

### 3. 供試体と撮影方法

X線CT撮影を行った供試体の使用材料を表-1に、コンクリートの基本配合を表-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。基本配合では、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55%を標準とし、45%~75%の範囲で設定した。細骨材率は40%を標準として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。コンクリート供試体は、基本配合を用い、直径125mm、

表-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 <sup>3</sup>                                       |
| 水    | つくば市水道水  |
| 粗骨材  | 砂岩砕石(粗骨材最大寸法40mm)<br>表乾密度2.68 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率2.68%                 |
| 細骨材  | A: 砂岩砕砂<br>表乾密度2.65 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率1.47%<br>実績率64.7%, F.M.2.63     |
|      | B: 川砂(大井川産)<br>表乾密度2.62 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率1.03%<br>実績率70.4%, F.M.2.82 |
|      | C: 山砂(君津産)<br>表乾密度2.68 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率1.17%<br>実績率67.8%, F.M.2.39  |
| 混和剤  | AE減水剤A1, 空気量調整剤A2  |

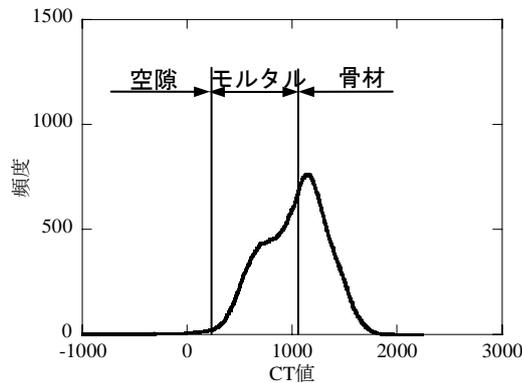


図-2 CT値の頻度分布

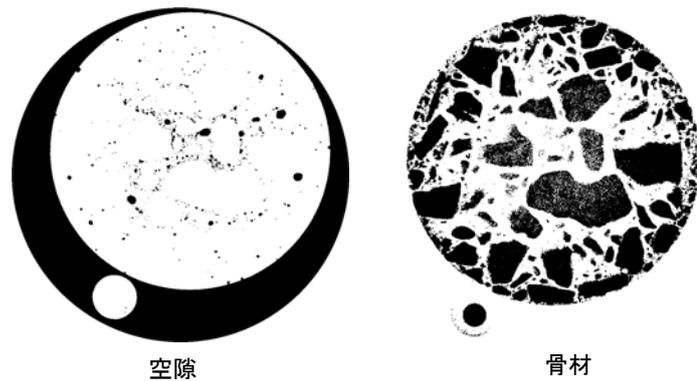


図-3 2値化画像

表-2 コンクリートの基本配合

| 配合<br>(A~Cは<br>細骨材<br>の種類) | 粗骨材の<br>最大寸法<br>Gmax<br>(mm) | スランプ       |            | 水セメ<br>ント比<br>(%) | 目標<br>空気量<br>(%) | 細骨材<br>率<br>(%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |      |     |         |        |      |       |
|----------------------------|------------------------------|------------|------------|-------------------|------------------|-----------------|--------------------------|------|-----|---------|--------|------|-------|
|                            |                              | 目標<br>(cm) | 実績<br>(cm) |                   |                  |                 | 水                        | セメント | 細骨材 | 粗骨材     |        | 混和剤  |       |
|                            |                              |            |            |                   |                  |                 |                          |      |     | 40-20mm | 20-5mm |      |       |
|                            |                              | W          | C          |                   |                  |                 | S                        | G1   | G2  | A1      | A2     |      |       |
| A-1                        | 40                           | 8.0        | 7.0        | 45                | 4.5              | 40              | 178                      | 396  | 691 | 524     | 524    | 0.99 | 0.049 |
| A-2                        | 40                           | 8.0        | 7.5        | 55                | 4.5              | 38              | 170                      | 309  | 692 | 571     | 571    | 0.77 | 0.039 |
| A-3                        | 40                           | 8.0        | 7.1        | 55                | 4.5              | 40              | 172                      | 313  | 725 | 550     | 550    | 0.78 | 0.039 |
| A-4                        | 40                           | 8.0        | 7.3        | 55                | 4.5              | 42              | 176                      | 320  | 754 | 527     | 527    | 0.80 | 0.040 |
| A-5                        | 40                           | 8.0        | 8.6        | 55                | 4.5              | 44              | 180                      | 327  | 783 | 504     | 504    | 0.82 | 0.041 |
| A-6                        | 40                           | 8.0        | 7.5        | 65                | 4.5              | 40              | 172                      | 265  | 741 | 562     | 562    | 0.66 | 0.040 |
| A-7                        | 40                           | 8.0        | 8.3        | 75                | 4.5              | 40              | 177                      | 236  | 746 | 565     | 565    | 0.59 | 0.041 |
| B-1                        | 40                           | 8.0        | 7.7        | 45                | 4.5              | 40              | 150                      | 333  | 733 | 562     | 562    | 0.83 | 0.025 |
| B-2                        | 40                           | 8.0        | 9.2        | 55                | 4.5              | 40              | 150                      | 273  | 753 | 578     | 578    | 0.68 | 0.027 |
| B-3                        | 40                           | 8.0        | 9.2        | 65                | 4.5              | 40              | 152                      | 234  | 764 | 586     | 586    | 0.59 | 0.023 |
| B-4                        | 40                           | 8.0        | 9.8        | 75                | 4.5              | 40              | 152                      | 203  | 774 | 594     | 594    | 0.51 | 0.020 |
| C-2                        | 40                           | 8.0        | 8.1        | 55                | 4.5              | 40              | 146                      | 265  | 777 | 583     | 583    | 0.66 | 0.027 |
| C-4                        | 40                           | 8.0        | 7.8        | 75                | 4.5              | 40              | 146                      | 195  | 801 | 601     | 601    | 0.49 | 0.019 |

表-3 X線CT撮影を行ったコンクリート供試体とモルタル供試体 (Gmax5mm) の一覧

| 供試体<br>(細骨材の<br>種類) | 細骨材率<br>(%) | 水セメント比 (%) |         |          |         |          |         |          |         |
|---------------------|-------------|------------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
|                     |             | 45         |         | 55       |         | 65       |         | 75       |         |
|                     |             | Gmax40mm   | Gmax5mm | Gmax40mm | Gmax5mm | Gmax40mm | Gmax5mm | Gmax40mm | Gmax5mm |
| A                   | 38          | —          | —       | A-2      | A-2     | —        | —       | —        | —       |
|                     | 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-4      | C-4     |

高さ 250mm の円柱供試体とした。また、コンクリートを 5mm ふるいでウエットスクリーニングしたモルタルについて同じサイズの供試体を作製した。ここでは、X線 CT 法で判別されるモルタル（比較的小さな骨材を含むセメントペースト）と区別するために、モルタル供試体（Gmax5mm）と表現する。基本配合を用いて実際に 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（Gmax5mm）の一覧を表-3 に示す。

X線 CT 撮影にあたり、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°Cの温度で 24 時間乾燥させた。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 断面を行った。

#### 4. 供試体内の鉛直分布

##### 4.1 空隙率

各断面の撮影画像に対して材料構成定量化法を適用し、供試体の面積に対する空隙や骨材の面積の比である空隙率や骨材率およびモルタル平均 CT 値を求めた。ここでは、求めた空隙率を  $Pr$  と定義する。図-4 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、縦軸を撮影位置とし、横軸に  $Pr$  の値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 2.0% から 3.6% 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。

本コンクリート供試体の空気量は 4.5% 程度であり、X線 CT 法による空隙率はこれより少ないことから、粒径の大きい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。

##### 4.2 骨材率

次に、材料構成定量化法で求めた骨材率を  $Gr$  と定義する。図-5 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（A-3, B-2, C-2）について、縦軸を撮影位置とし、横軸に  $Gr$  の値を示したものである。供試体の骨材は 27.4% から 46.9% 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。

##### 4.3 モルタル平均 CT 値

同様に、材料構成定量化法により求めた空隙と骨材を除くモルタル部分のモルタル平均 CT 値を  $M_{CT}$  と定義する。図-6 は、B の水セメント比の異なる各コンクリート供試体について、縦軸を撮影位置とし、横軸にモルタル平均 CT 値  $M_{CT}$  の値を示したものである。

水セメント比が小さい配合ほど  $M_{CT}$  が大きく、いずれ

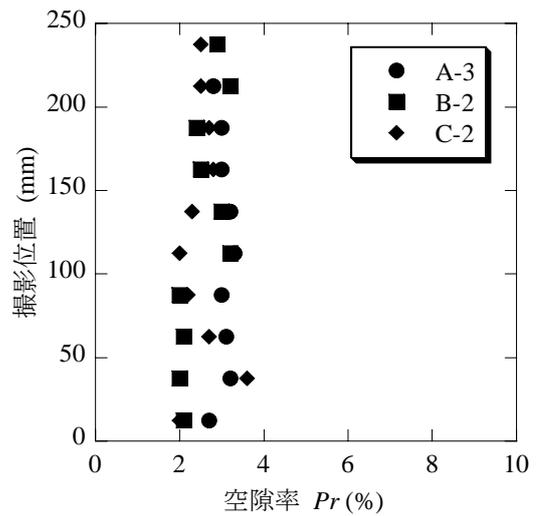


図-4 空隙率の鉛直分布

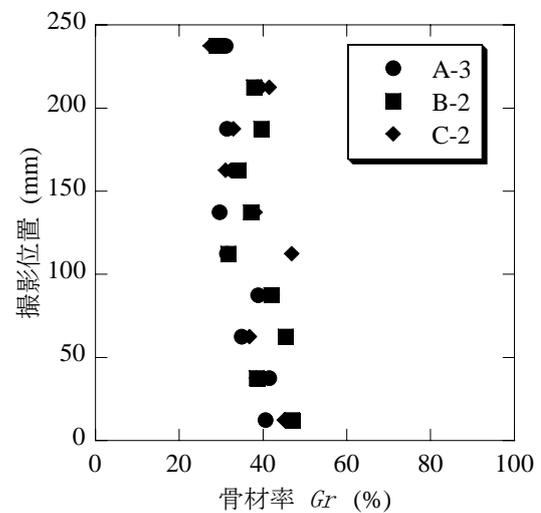


図-5 骨材率の鉛直分布

の配合においても供試体の上部ほど  $M_{CT}$  が小さい傾向であることがわかる。 $M_{CT}$  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。

X線CT法で評価した空隙率の鉛直分布では、偏った分布が認められなかったが、骨材率やモルタル平均CT値の鉛直分布の偏りからは、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を生じた可能性が考えられる。また、水セメント比が小さい配合ほど上下の  $M_{CT}$  の差は小さく、水セメント比が大きいと上下の  $M_{CT}$  の差は大きい傾向であり、水セメント比の大きい配合ほど材料としての粘性がなく、材料分離が顕著であったと推察される。なお、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た。

一方、ウエットスクリーニングにより作製したモルタル供試体（Gmax5mm）の  $M_{CT}$  の鉛直分布を図-7 に示す。

鉛直分布は、図-6の分布よりも若干滑らかではあるもののコンクリート供試体と同様の傾向であり、材料構成定量化法によりモルタル部の密度を相対的に精度よく評価できたといえる。

### 5. モルタル平均 CT 値による特性評価

#### 5.1 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φ125mm, 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  $M_{CT}$  (mean) の関係を図-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Gmax40mmのコンクリートとGmax5mm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  $M_{CT}$  (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、Gmax40mmのコンクリートとGmax5mmのモルタルで供試体の  $M_{CT}$  (mean) の評価が若干乖離している。この原因は不明であるが、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も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。

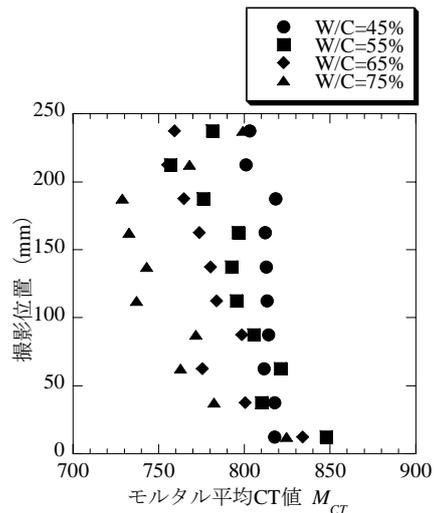


図-6 モルタル平均 CT 値の鉛直分布 (Gmax40mm)

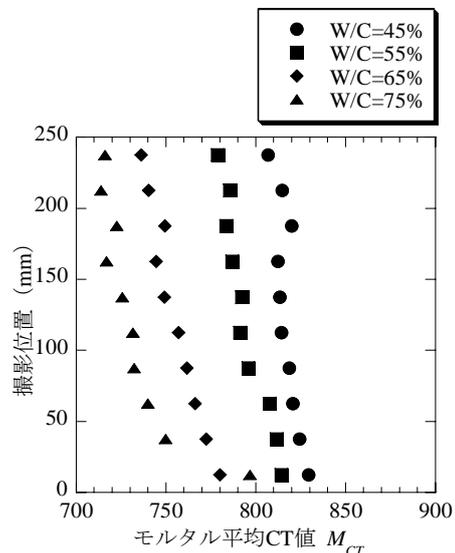


図-7 モルタル平均 CT 値の鉛直分布 (Gmax5mm)

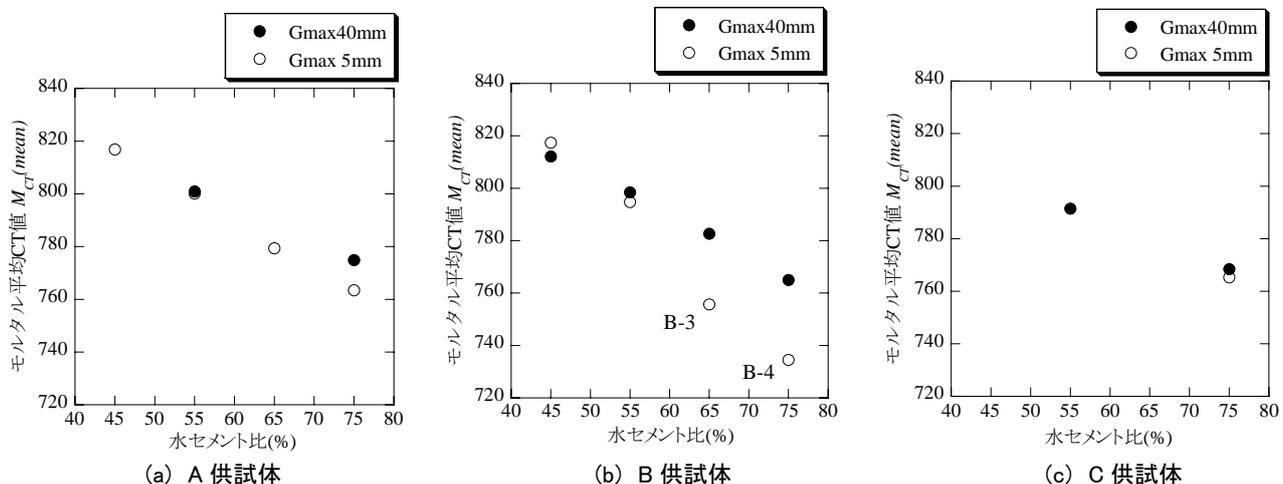


図-8 水セメント比とモルタル平均CT値  $M_{CT}$  (mean)

## 5.2 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  $M_{CT}$  (mean) の関係を図-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44%の  $M_{CT}$  (mean) は若干小さく評価されているが、細骨材率38%、40%および42%の  $M_{CT}$  (mean) はほとんど差がないことがわかる。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。

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や細骨材率が若干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と考えられる。

## 6. コンクリートの配合推定

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値は水セメント比と高い相関があることがわかった。この傾向は単位セメント量についても同様である可能性が考えられる。

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  $M_{CT}$  (mean) と水セメント比  $W/C$  の関係を図-10 に、  $M_{CT}$  (mean) と単位セメント量  $C$  の関係を図-11 に示す。それぞれの図において、  $M_{CT}$  (mean) から水セメント比  $W/C$  を求める推定近似式を式(2) に、単位セメント量  $C$  を求める推定近似式を式(3) に示す。

$$W/C (\%) = -0.44 (\%) \cdot M_{CT} (\text{mean}) + 407 (\%) \quad (2)$$

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

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。

次に、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(2)及び式(3)を用いて、水セメント比と単位セメント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

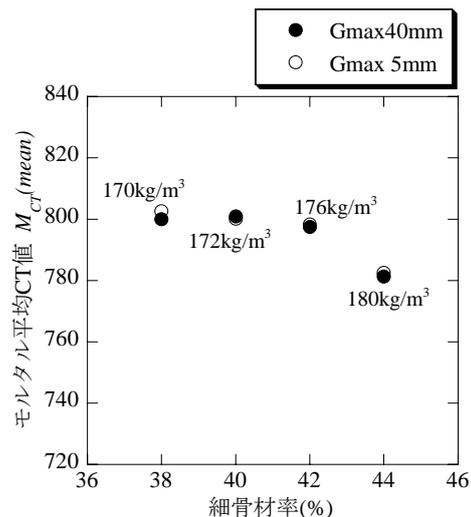


図-9 細骨材率とモルタル平均CT値

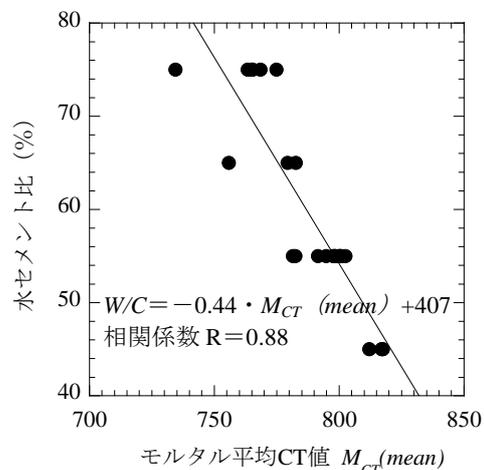


図-10 モルタル平均CT値と水セメント比

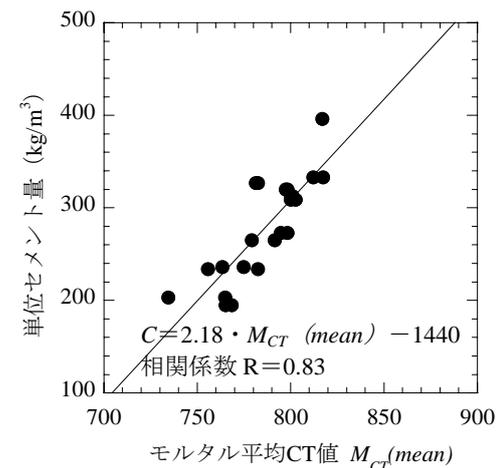


図-11 モルタル平均CT値と単位セメント量

の水セメント比の関係を図-12 に、推定した単位セメント量と実際の単位セメント量との関係を図-13 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」<sup>2)</sup>による化学分析手法との比較

も行い、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配合推定法は、通常の化学分析で使用する設備を使用できるので、設備上の制約は少ないものの、骨材に酸化カルシウムが含まれる場合などには不適とされている。図-12、13には「セメント協会法」推定した水セメント比と単位セメント量を白抜ききの点で示した。

図-12には5%乖離した線を2本の点線で示している。大部分のプロットが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、同程度以上の精度があることがわかる。

図-13には50kg/m<sup>3</sup>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/m<sup>3</sup>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/m<sup>3</sup>の乖離、W/C=65%の供試体で50kg/m<sup>3</sup>の乖離であり、同程度の精度であるといえる。

## 7. まとめ

水セメント比や細骨材率を変えたコンクリート供試体にX線CT法を適用し、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。今回作製し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、得られた相関関係を用いて水セメント比や単位セメント量など、配合を推定できる可能性のあ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。従来の化学法と比較すると、X線CT法には可視化というメリットがあり、目視による骨材や空隙の状況観察を含めて供試体の状況を総合的に評価することができるため、信頼性を得やすいという特徴があると思われる。

今後は、生コン工場で製造されたコンクリートの標準供試体や、さらには材料が未知なコンクリートを用いて硬化コンクリートの特性評価を行うなど、対象とするコンクリートの範囲を拡大した試験を実施し、X線CT法を用いた硬化コンクリートの特性評価に関する研究を継続していく予定である。

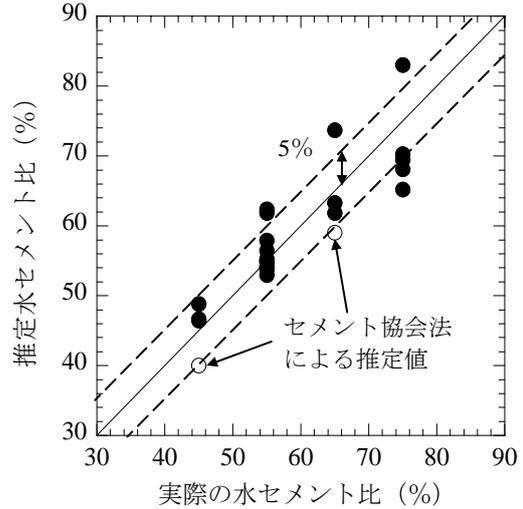


図-12 水セメント比の推定結果

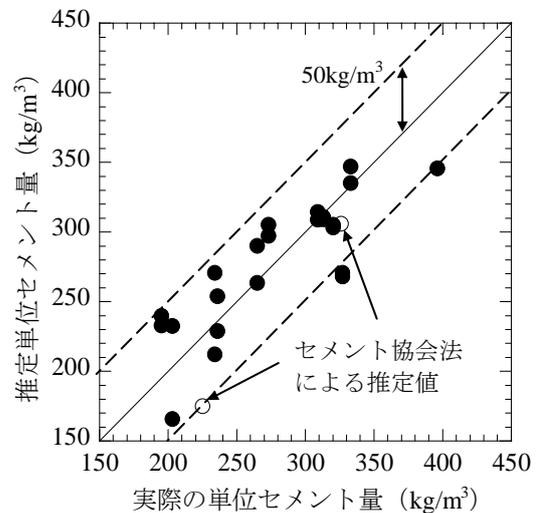


図-13 単位セメント量の推定結果

## 参考文献

- 1) 天明敏行, 伊藤 剛, 濱崎 大志, 尾原 祐三: X線CT法を用いたコンクリートの材料構成定量化法の提案, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学協会, Vol.30, No.2, pp.739-744, 2008.6
- 2) 社団法人セメント協会: 硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験結果, コンクリート専門委員会報告 F-18, 1967