# 論文 X線CT法による硬化コンクリートの強度に影響を及ぼす要因の分析

天明 敏行\*1·尾原 祐三\*2·吉永 徹\*3

要旨: 非破壊検査技術として用いられる X 線 CT 法は,物体の内部構造を非破壊で可視化できるだけでなく, 撮影画像の数値データである CT 値を用いて画像を定量的に解析することが可能である。本研究では, X 線 CT 法を用いて硬化コンクリートの強度を予測することを目的に,コンクリートを空隙,骨材,モルタルに区 分して骨材や空隙の空間に占める比率やモルタル CT 値の情報を整理し,これらの情報と強度との相関を検討 した。この結果,特にモルタル部の平均 CT 値はコンクリートの強度と深い関係にあることを確認した。 キーワード:X線 CT 法, CT 値,材料構成定量化法,コンクリート強度

## 1. はじめに

コンクリート構造物の健全性を診断する際に, コンク リートの強度を調査することは,構造物全体の健全性を 把握する上で有効である。このため,通常では表層部の 打撃による試験やコア抜きしたコンクリート供試体の 破壊試験による強度の調査が実施されている。しかし, 表層から内部に向かってどのような劣化が進行してい るかというような深さ方向の評価を行うのは難しい。

一方,近年コンクリートの強度に関連して,損傷の可 視化や定量的評価を目的に X 線を適用した研究が進め られている。武田ら<sup>1)</sup>はコンクリート内部のひび割れや 空隙を X 線造影撮影より同定し,コンクリート強度の推 定を行っている。橋本ら<sup>2)</sup>は, X 線 CT 法による 3 次元 立体画像からコンクリート内部の劣化状況を評価し,そ の適用性を確認している。また,山岸ら<sup>3)</sup>は,コンクリ ートの損傷度を X 線 CT 法で評価し,損傷の進行と CT 値の低下が密接に関係していることを明らかにしてい る。

これらの研究成果より, X線 CT 法を用いてコンクリ ート内部に発生した初期欠陥などの空隙やマイクロク ラックの定量化を行うことが可能であると考えられ, X 線 CT 法の利用によりコンクリート強度の推定が可能に なると考えられる。

また, X線 CT 法を適用することによって強度の推定 が実施できるようになれば、コア抜きしたコンクリート の供試体の X線 CT 画像から、深さ方向の分布の状況把 握も可能となる。このことは構造物の健全性を診断し、 維持管理を実施する上で有効となる。

本研究では、コンクリート構造物をコア抜きしたコン クリート供試体に X 線 CT 法を適用し、筆者らが提案す る材料構成定量化法<sup>4)</sup>を用いてコンクリートを空隙、骨 材、モルタルに区分し、それぞれの CT 値や空間占有率

\*1 安藤ハザマ 土木事業本部技術第三部 博(工)(正会員) \*2 熊本大学大学院 自然科学研究科教授 工博 \*3 熊本大学工学部 技術部

(空隙率・骨材率)を求めた。

次に,求めた空隙率,骨材率,モルタル平均 CT 値と いった各構成材料の情報と圧縮強度試験の結果を比較 検討し,コンクリートの強度に影響を及ぼす要因を分析 するとともに,経過年数や各構成材料の情報相互の相関 を比較検討した。

## 2. X 線 CT 装置

本研究で使用した装置は産業用 X 線 CT スキャナであ る。装置の外観を図-1 に,遮蔽室内の状況を図-2 に 示す。

撮影は図-2 に示すように遮蔽室内のターンテーブル に供試体を設置し,完全密閉してから行った。X線管か らX線が照射され,供試体を通過したX線を検出器が受 け取り,投影情報をフィルタ補正逆投影法により画像を 再構成した。

撮影の際, X線管と検出器は供試体の高さに合わせて 上下方向に移動が可能である。X線は30度の角度で照射 されるが,1方向の照射では供試体の投影情報は不十分 である。そのため、ターンテーブルが往復並進移動し、 両端で30度回転することで多方向からの投影情報を得 ることができる。その回転角度は180度であり、さらに 角度が大きいほど、より多くの投影情報が得られ、鮮明 な画像が得られる。また、一般にX線管によって発生す るX線は円錐状に広がるため、X線管と検出器にはコリ メータを設け、X線を平面形状に調整できるよう工夫が なされている。その平面形状に調整して照射されたとき のX線の厚さをスライス厚と呼ぶ。本装置ではX線管の 電圧、撮影高さ、撮影の回転角度、スライス厚、撮影領 域、撮影画素数を設定することができる。本研究で使用 したX線CT装置の仕様を表-1に示す。



図-1 X線CTスキャナ外観

# 3.X線CT法と材料構成定量化法

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。

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X線 CT 法を適用した。

コンクリート円柱供試体の X 線 CT 画像の例を図-3 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。

$$\operatorname{CT} \operatorname{\acute{le}} = \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w} K \tag{1}$$

ここで、 $\mu_1$ 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>4</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



図-2 X線CT装置の遮蔽室内の状況

表-1 X線CT装置の仕様

管電圧	150, 200, <u>300</u> kV
最高撮影高さ	600 mm
撮影回転角度	<u>180</u> , 360, 720°
スライス厚	0.3, 0.5, 1.0, <u>2.0</u> , 3.0, 4.0 mm
撮影領域	<u>150</u> , 400 mm
撮影画素数	512×512, <u>1024×1024</u> , 2048×2048 pixel

下線は本研究で使用した設定



図-3 X線CT画像



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-3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-4に、空隙と骨材のそれぞれを2値化したものを図-5に示す。図-5の上図では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、黒い部分の面積の総和を供試体の断面積で除した値を空隙率と定義すると、この画像では2.0%となる。

図-5の下図に示したものは、空隙率を求めたときと 同様に、骨材-モルタル境界 CT 値をしきい値として二 値化処理を行った画像である。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。ここでは、黒い骨 材部分の面積の総和を供試体の断面積で除した値を骨 材率と定義し、この画像では45.1%となる。

図-4 に示す頻度分布で,モルタル部の 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部の総ピ クセル数で除した値をモルタル平均 CT と定義する。

## 4. コンクリート供試体と撮影方法及び圧縮強度試験

本研究では九州地方にある教育施設のコンクリート 建築物等から耐震評価を行うためにボーリングされた コンクリートコアを供試体とした。供試体の寸法は直径 100mm,高さはそれぞれで異なる円柱供試体である。X 線 CT 撮影を行ったコンクリート供試体を表-2 に示す。 A~S までの19 種類の建築物からコア抜きされた供試体 が各 2~25 本あり,総数は114 本である。IとJの建築物 のみ経過年数が不明であるが,他の建築物は経過年数が 既知であり,古い構造物で1969 年に建設され41 年経過 したもの,新しいもので1982 年に建設され28 年経過し たものとなっている。

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℃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時間以上自然冷却させた後に,X線 CT 撮影を行った。また,撮影は各供試体について約50mm 間隔で3断面を行った。

圧縮強度試験は X 線 CT 撮影した供試体を JIS A 1108 に準拠して実施した。





図-5 2値化画像

表-2 コンクリート供試体

供試体	本数	経過年
А	14	28
В	25	29~32
С	3	33
D	1	32
E	6	32
F	9	32
G	12	29~38
Н	8	30~33
I	4	不明
J	4	不明
К	5	30~32
L	2	38
М	2	32
N	2	36
0	2	34
Р	6	41
Q	2	33
R	3	41
S	4	31~33
計	114	—

## 5. 各内部情報と圧縮強度の関係

#### 5.1 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。A ~Sの建築物のうち、供試体の本数の多いAとB及びT (全供試体)について、空隙率と圧縮強度の関係をプロ ットしたものを図-6 に示す。以降の図も含め、図には 最小二乗法による近似曲線と効果の高さを示す決定係 数 R<sup>2</sup>を示している。

空隙率は、AとB及びT共に圧縮強度との相関は低く、 一様にばらついていることがわかる。武田ら<sup>1)</sup>の既往の 研究では、X線造影撮影で評価した空隙率と圧縮強度に 高い相関が認められているが,本研究で実施している材 料構成定量化法によって評価した空隙率では,空隙の量 が圧縮強度に及ぼす影響は小さいと考えられる。

## 5.2 骨材率

次に,材料構成定量化法で求めた骨材率と圧縮強度の 関係について,空隙と同様に供試体 A と B 及び T につ いて整理を行った,A と B, T について骨材率と圧縮強 度の関係を図-7 に示す。

AとBに関しては骨材率が大きくなるにしたがい,圧 縮強度が大きくなる傾向が顕著であり,骨材率が強度に 影響を及ぼしていることがわかる。しかし,全供試体の データにおける骨材率と圧縮強度の関係を示したTでは, ややばらつきが大きい。これらの結果より,骨材の種類



が同じコンクリートであれば,骨材率が大きくなるほど 圧縮強度が大きくなる傾向にあるといえる。骨材率と強 度の直接的な関係はこれまであまり明らかにされてい ないが,一般に骨材の最大寸法が同じ骨材では,粒度分 布が適切な骨材は実積率が大きくなることから,良質の 骨材を用いたコンクリートほど骨材率が大きくなり,圧 縮強度が大きくなる傾向になると考えられる。一方,骨 材の種類が異なれば,圧縮強度のレベルも異なるため, 材料の異なるコンクリートについては骨材率と圧縮強 度の相関性が低くなること考えられる。

# 5.3 モルタル平均 CT 値

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 値について,空隙や骨材 と同様に,供試体 A と B 及び全供試体のデータについて 整理を行った。A と B, T についてモルタル平均 CT 値 と圧縮強度の関係を図-8 に示す。

A と B に関してはモルタル平均 CT 値が大きくなるに したがい圧縮強度が大きくなる傾向が顕著であり,モル タル平均 CT 値が強度に影響を及ぼしていることがわか る。しかも全供試体のデータにおけるモルタル平均 CT 値と圧縮強度の関係を示した T においても若干ばらつき が大きいが,モルタル平均 CT 値が大きくなるにしたが い,圧縮強度が大きくなる傾向であることがわかる。

CT 値は密度と相関が高いことから,セメント水比の 大きいコンクリートほど密度が高く,圧縮強度が大きく なることが主たる原因として推察できる。そして,この 傾向は骨材率と強度の関係とは異なり,モルタルの材料 すなわちセメントや砂の種類が異なってもあまりばら つきがない。したがって,材料が未知のコンクリートに 対してもモルタル平均 CT 値を求めることによって強度 を推定できる可能性がある。

# 6. 経過年数の影響

X線 CT 法で求めた空隙率・骨材率・モルタル平均 CT 値の各パラメータと圧縮強度についてコンクリート供 試体の経過年数について整理を行った。経過年数と空隙 率,骨材率,モルタル平均 CT 値及び圧縮強度のそれぞ れの関係を図-9~12 に示す。

これらの関係はばらつきが多いが,経過年数とともに 空隙率はあまり変化がなく,骨材率は上昇傾向,モルタ ル平均 CT 値と圧縮強度は下降傾向にあることがわかる。

経過年数の長いコンクリートほど骨材率が大きく,モ ルタル平均 CT 値と圧縮強度が小さい。モルタル平均 CT 値が大きいほど圧縮強度が大きくなることは前述した ものと同じ結果である。また,骨材率が大きいほど圧縮 強度が小さくなっているのも,種類の異なるなる骨材を 使用しているためであり,経過年数の長いコンクリート





は、骨材率が大きいにもかかわらず、モルタル平均 CT 値が小さく、圧縮強度も小さいと評価できる。

次に,相関性の高いモルタル平均 CT 値と圧縮強度に ついて経過年数が 29 年以下の新しい供試体,30~39 年 の供試体と 40 年以上の古い供試体に分けてプロットし たものを図-13 の a~c に示す。経過年数が 30~39 年 の供試体については相関性がやや低いが,特に 29 年以 下の供試体については相関が高く,近年のコンクリート であれば,モルタル平均 CT 値と圧縮強度の相関はさら に高いことがわかる。

-3	決定係数	$(\mathbb{R}^2)$
----	------	------------------

	空隙率(%)	骨材率(%)	モルタル 平均CT値	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	経過年数 (年)			
空隙率(%)		0.020	0.009	0.001	0.020			
骨材率(%)	0.020		0.164	0.008	0.199			
モルタル 平均CT値	0.009	0.164		0.306	0.118			
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	0.001	0.008	0.306		0.128			
経過年数 (年)	0.020	0.199	0.118	0.128				

#### 7. コンクリート強度に影響の強い因子

表

コンクリート強度に影響の強い因子を検討するため に、以上述べてきた空隙率・骨材率・モルタル平均 CT 値と圧縮強度の各相関について、最小二乗法による回帰 式の効果の高さを示す決定係数 R<sup>2</sup>を求めた。結果を表-3 に示す。表より、最も決定係数が大きく(1 に近く)、 回帰式による説明が効果的なのは、モルタル平均 CT 値 とコンクリート強度の関係であることがわかる。

# 8. まとめ

ボーリングされたコンクリート供試体の X 線 CT 撮影 断面から,空隙率・骨材率・モルタル平均 CT 値に対す る圧縮強度の各関係を求めた。

この結果,同じ構造物のコンクリートであれば,骨材 率とコンクリート強度の相関は高いことがわかった。

次に, モルタル平均 CT 値とコンクリート強度は, 同 じ構造物や経過年数 29 年以下のコンクリートで相関が 高いことがわかった。また, 異なる構造物のコンクリー トについても相関性があることから, X線 CT 法は材料 が未知のコンクリートに対してもコンクリートの強度 の推定に有効であると考えられる。

#### 参考文献

- 武田三弘,大塚浩司,X 線造影撮影によるコンクリート強度の推定,土木学会論文集,E, Vol.62, 376-384, 2006
- 橋本勝文,横田弘,杉本隆文,吉川昂純,凍結融解 作用を受けたモルタルの X 線 CT 撮影による空隙 構造評価,材料, Vol.62, No.8, pp.492-497, 2013
- 山岸俊太朗,鈴木哲也,森井俊広,X線CTの空間 統計処理に基づく損傷コンクリートの特性評価,新 大農研報,67(1):79-84,2014
- 4) 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