

論文 医療用 X 線 CT スキャナを用いた硬化コンクリートの品質評価手法の検討

岡林 徹*1・横井 克則*2・浦本 豪一郎*3

要旨：医療用 X 線 CT スキャナを用いた調査研究において、CT 値の画像解析で、岩石コア等の調査において成果をあげている。一方、硬化コンクリートの分野における利用は限定的である。本研究では硬化コンクリートの品質評価、手順の確立および精度の有用性について実験を行った。配合は単位水量を一定とし W/C を 3 水準とした。使用骨材は石灰系および砂岩系とした。調査項目として空気量、単位粗骨材量、C/W 及び圧縮強度の推定を試みた。空気量ではエントラップトエアと推定されるものが 1~2%、単位粗骨材量推定では 2~15%の誤差で検出できた。また、C/W 及び圧縮強度と CT 値の相関は比較的大きいことが確認できた。

キーワード：CT 値、二値化、空気量、C/W、圧縮強度、単位粗骨材量

1. はじめに

X 線 CT スキャナは 1963 年にコーマックが画像再構成のいくつかの数学的な原理を定式化した。その後、イギリス人の技術者ハンスフィールドが商業レベルの X 線 CT スキャナを開発した。その功績から両氏はノーベル医学生理学賞を受賞している。1970 年代に医学会で用いられるようになり、1980 年代には稼働中の X 線 CT スキャナは 1 万台を超えたとされ、現在は数えきれないほどである。また、その性能は、コンピューターや周辺機器の高性能化に伴い空間分解能が向上し、1980 年代では 1 mm を下回り、現在では、数百 μm の病巣を検出可能になっている。医療以外でも 1980 年代以降に文化財調査、自動車、電子機器等に X 線量を増加させ分解能を向上させた機器で観察が行われている。

近年では産業用 X 線 CT スキャナを利用したコンクリートの内部構造の解明等が進められ成果をあげている²⁾。天明ら³⁾は、X 線 CT で得られる情報を画像処理することで内部構造を可視化するだけでなく、CT 値を用いてコンクリートの空隙量、モルタル量および骨材量等の特性値を推定する方法を提案している。

本研究において使用した医療用 X 線 CT スキャナを用いた調査研究では、海底掘削コアや岩石コアの堆積物の CT 値をベースに画像を再構成することで、肉眼では判別できない層などの評価において成果をあげており、地質学的な研究の一部となっている。

一方、硬化コンクリート分野においては医療用 X 線 CT スキャナを利用する機会が非常に少なく研究成果の報告などは見受けられない。コンクリートは水、セメント、細骨材、粗骨材等の複合材料であり、内部構造を可視化し骨材の割合等を評価することによる品質評価、二値化

による空隙情報の取得、CT 値と圧縮強度や C/W の相関を検証することによる配合の推定等の可能性がある。しかし、医療用 X 線 CT スキャナは対象を人体としており、管電圧や X 線照射量に制限を設けているため、産業用と比べ分解能が小さくなる懸念がある。海底掘削コアや岩石コアの堆積物について、高知大学海洋コア国際研究所では既に画像分析手順を確立しており、多くの研究者が使用している。

本研究では、その手順を参考にコンクリートの品質評価を行うこととし、医療用 X 線 CT スキャナの測定限界、測定項目等について検証し有効性を検証し、医療用 X 線 CT スキャナのコンクリート分析についての可能性及び品質評価の手順の検討を行う。

2. 実験内容

2.1 医療用 X 線 CT スキャナ

医療用 X 線 CT スキャナの仕様を表-1 に、外観を写真-1 に示す。本研究では高知大学海洋コア国際研究所所有のキャノンメディカルシステムズ(株) Aquilion PRIME/Focus Edition を使用した。X 線照射後に得られるデータを再構成し画像処理化する。そのデータは医療用画像の標準フォーマットである DICOM ファイルで出力され、CT スキャナ付属のパソコンに付属の医用画像解析アプリである Osirix で連続展開される。DICOM フ

表-1 医療用 X 線 CT スキャナの仕様

管電圧	120kV
管電流	100mA
X 線照射時間	0.5 秒
スライス厚みおよび画像再構築間隔	0.5mm
画素数	512×512pixels
フィルタ	FC85

*1 高知県コンクリート診断士会 (正会員)

*2 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科教授 博士(工学) (正会員)

*3 高知大学 海洋コア国際研究所 講師 博士(理学)

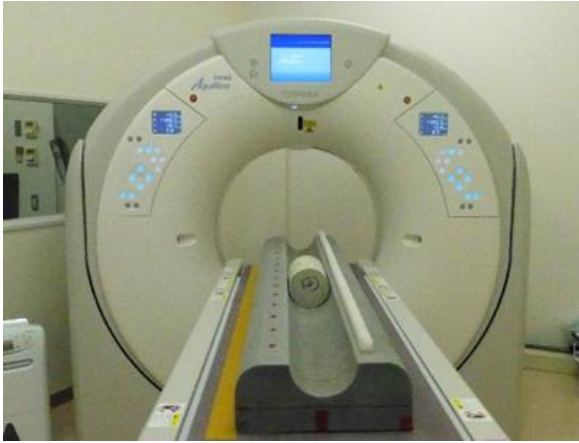


写真-1 医療用 X 線 CT スキャナ

表-2 使用材料の品質

材料名	表乾密度(g/cm ³)	吸水率(%)
石灰砕砂	2.65	0.79
砂岩砕砂	2.59	1.78
石灰砕石 2005	2.69	0.79
砂岩砕石 2005	2.61	1.15
普通セメント	3.16	—

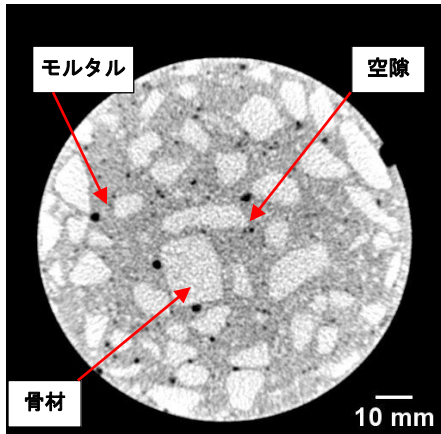


図-1 CT 断面画像

ファイルはその他の解析ソフトで使用できる。

2.2 材料および配合

本研究に使用した材料の品質を表-2に、配(調)合を表-3に示す。骨材の種類は高知県で多く産出され、密度や吸水率の異なる石灰系及び砂岩系とした。セメントは普通ポルトランドを使用した。配合では単位水量を一定としてW/Cを50, 60, 70%の3水準とした。

2.3 CT値とCT画像

φ100×200 mmの供試体の測定時間は数分程度である。分解能は関心領域(FOV)の大きさによって変わる。本研究ではφ100 mmの供試体を用いるのでFOVは103 mmとした。画素数は512×512pixelであり、1ピクセル当たりの面積は0.2×0.2 mmである。

X線CTスキャナでは人体各組織とX線吸収係数を計算によって画像を抽出する装置であるが、その際に白黒の濃淡を画像化する際に、CT値(Hounsfield unit:HU)という単位を使用する⁵⁾。

CT値は式(1)により算出される。

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

ここに、 μ_t : 求める点のX線吸収係数、 μ_w : 水のX線吸収係数、 k : 人や骨材などを撮影する際の係数で通常は1000

テストピースのCT画像を図-1に示す。黒い部分が空隙、グレーの部分がモルタル、白い部分が骨材を示す。骨材は5.0mm程度まで認識できた。

3. 実験結果

3.1 空気量推定

画像解析ソフトは医用や生化学の実験で使用されているImageJの上位交換ソフトであるImageJ Fijiを使用した⁶⁾。CTを用いて行う方法とASTM C457のリニアトラバース法から得られる面積比法を用いて比較した。CT画像処理を行うメリットは、供試体全体を分析対象とするため、一般の分析に比べサンプリングによる影響を受けにくいことにある。CTを用いる場合は任意の断面から気泡部の外周と面積率から推定する方法(以下 CT-2D

表-3 配(調)合表

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				(ml/m ³)	
			C	W	S	G	AE	AE(助)
50L	50	46	346	173	829	976	865	1038
60L	60	48	288		888	966	720	864
70L	70	50	247		943	946	618	742
50S	50	46	346		801	947	865	1038
60S	60	48	288		859	937	720	864
70S	70	50	247		911	918	618	741

※配合名の後のローマ字のLは石灰石、Sは砂岩を示す。

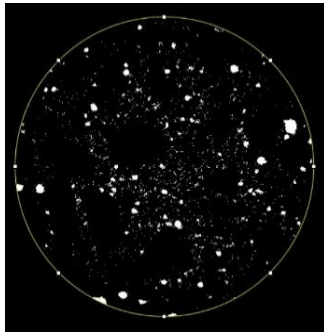


図-2 気泡の二値化画

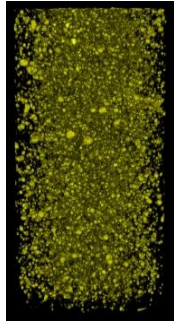


図-3 3D 画像

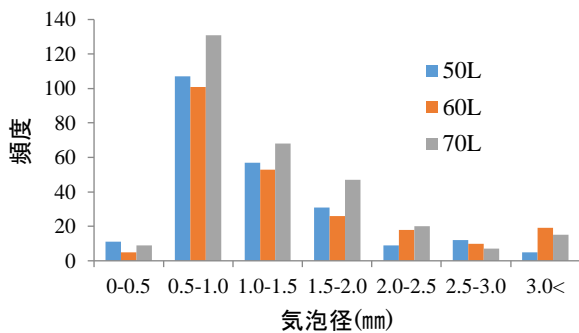


図-4 気泡ヒストグラム (CT-2D 法)

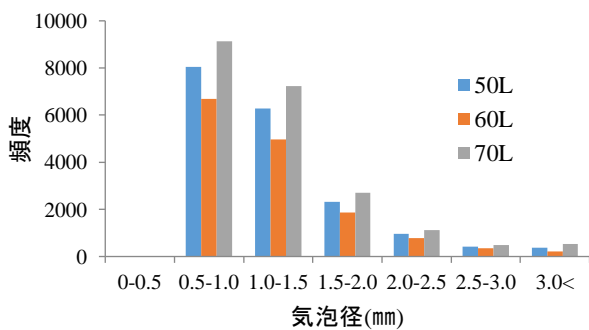


図-5 気泡ヒストグラム (CT-3D 法)

法と称す)と、0.5 mm 間隔でスライス処理された全断面から再構成された立体構造部の気泡部がボクセルとして分析され算出する方法(以下 CT-3D 法と称す)にて実施した。材齢は 28 日で CT 撮影を行った。

画像処理する際に気泡部とそれ以外の部分を二値化する必要がある。このため、CT 画像を 8bit としノイズ処理を施すことで処置した。二値化した画像を図-2、3D 化した画像を図-3 に示す。さらに、気泡ヒストグラム (CT-2D 法)を図-4 に、気泡ヒストグラム (CT-3D 法)を図-5 に空気量推定の結果一覧を表-4 に示す。

CT を用いて解析を行う際は図-2 に示すように二値化することで、平面的に空隙の分布状態を確認できた。さらにイメージング機能により、3D 化した空隙状態を図-3 のように可視化できた。

表-4 空気量推定 (%)

配合名	エアメータ法による実測値	面積比法	CT-2D 法	CT-3D 法
50L	5.4	1.86	2.45	2.60
60L	6.3	4.10	2.97	3.44
70L	5.4	5.74	3.44	3.43
50S	4.4	2.98	1.77	1.96
60S	3.3	2.14	2.14	2.35
70S	3.3	2.20	2.44	2.58

空気量の推定では、リニアトラバースによる面積比法では 70L を除き実測値より小さい空気量となった。粗骨材の種類による差は砂岩系と比べ石灰系が大きい結果となった。W/C による差も同傾向であった。測定は任意の面(今回は供試体の中央)のみで測定するためバラツキが大きい結果になったと推測される。CT 撮影で得られた測定結果は、実測値のより小さい結果となり、CT-3D 法が大きい値となった。W/C が小さいほど空気量が少ない傾向が認められた。

試験方法により空気量の算出方法に差異があり、測定に影響を与えた可能性がある。面積比法と CT-2D 法は任意の断面の状態から気泡部分を検出する。前者はトラバース線の断線箇所を気泡の直径として算出し、後者は検出されたそれぞれの気泡の外周長から気泡を算出する。CT-3D 法は供試体を長さ方向に 0.5 mm でスライスした断面とスライス幅を高さとした空間(ボクセル)を構築し図-3 に示した 3D 画像よりボクセル毎の体積が算出され、指定空間の体積比より空気量を求める。ボクセルは CT の分解能に影響される。断面方向は 512×512 ピクセルで 1 ピクセルは 0.2 mm×0.2 mm であるのに対しスライス間隔は 0.5 mm であるので、捉えた気泡は縦長い形状であることに留意する必要がある。以上により仮想の空隙の導き方の違いが測定結果に与えた影響が大きいと推測される。

気泡径の分布について、CT-3D 法では前述の通り気泡がボクセルとして検出されるので、その体積を仮想球体として式(2)(3)(4)より球形の直径を算出した⁸⁾。

$$V = \frac{4\pi r^3}{3} \quad (2)$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}} \quad (3)$$

$$d=2r = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} \quad (4)$$

ここに、 V ：仮想球体ボクセルの体積(mm³), r ：仮想球体の半径(mm), d ：仮想球体の直径(mm)

図-4 及び図-5 に示す通り、気泡径の分布により確認された直径はCT-2D法では0.05mm区間の気泡が確認され、CT-3D法では0.5mm以上のものが検出された。検出気泡の差は、後者では画像を3Dに再構成したボクセルより算出される。その場合スライス間隔が0.5mmでありスライス方向に大きい気泡となることが原因である。コンクリートに含まれる気泡のうち製造時に混入される

表-5 圧縮強度とCT値

材齢	28d		91d	
	圧縮強度(N/mm ²)	CT値(HU)	圧縮強度(N/mm ²)	CT値(HU)
50L	29.8	2077	42.3	2075
60L	27.4	2061	33.9	2040
70L	22.8	1972	29.8	2036
50S	48.0	1903	53.4	1883
60S	35.2	1891	44.4	1872
70S	28.5	1860	35.5	1824

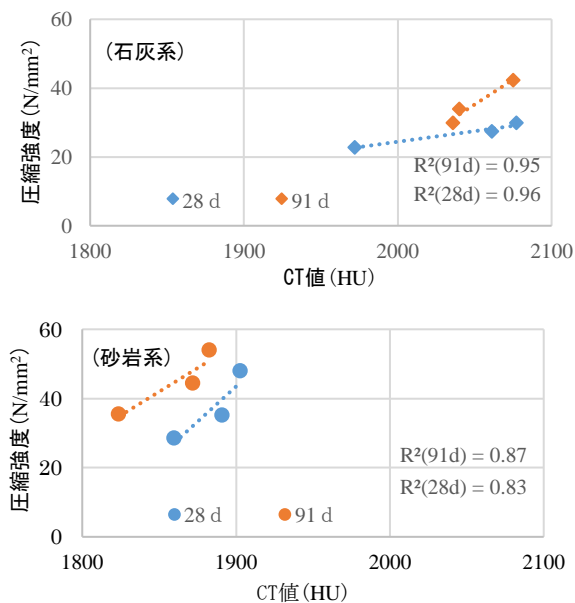


図-6 CT値-圧縮強度

表-6 C/WとCT値

配合	C/W	CT値(HU)28d	CT値(HU)91d
50L	2.00	2077	2075
60L	1.66	2061	2040
70L	1.43	1972	2036
50S	2.00	1903	1883
60S	1.66	1891	1872
70S	1.43	1860	1824

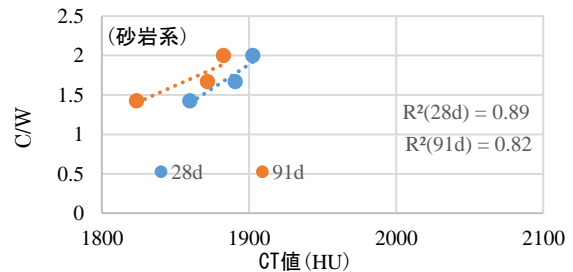
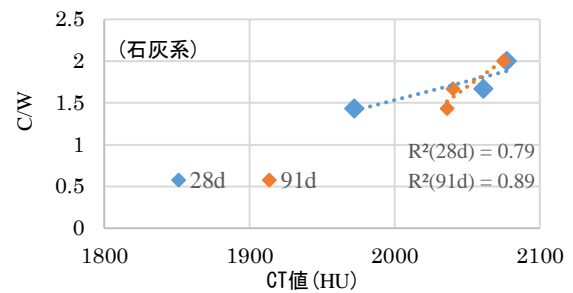


図-7 CT値-C/W

比較的大きな空気泡(100μ~10mm)がエントラップトエアであり⁹⁾, その量は0.2~2.0%であることが知られている¹⁰⁾。以上のことから医療用X線CTで検出された気泡はエントラップトエアであったと推測される。

3.2 CT値と圧縮強度の相関

材齢28日と91日において、X線CTスキャナで得たCT値をImageJ Fijiの解析のヒストグラムで情報を得ることが可能である。CT値はスライス毎のピクセル単位で得られたCT値の点群データである。ImageJ Fijiではヒストグラム解析でCT値の最頻値(MODE)が得られる。本研究の配合表からモルタル部の占める容積はその値が最大であることから、最頻値(MODE)はモルタル部であると推測した。圧縮強度とCT値の一覧表を表-5に、相関図を図-6に示す。

CT値と圧縮強度については材齢28日および91日共に、CT値が増加するに従い圧縮強度も増加する傾向となった。さらに、材齢と使用骨材の種類によって分けることで両者には強い正の相関を示した。

3.3 CT値とC/Wの相関

圧縮強度と同じく材齢28日と91日におけるCT値とC/Wとの相関について調査を行った。CT値の算出は前項と同じくヒストグラムで得られる最頻値(Mode)とした。結果一覧を表-6に、相関図を図-7に示す。

CT値とC/Wの相関について、CT値の増加に伴いC/Wも大きくなる傾向を示した。また材齢と使用骨材の種別を分けることで圧縮強度と同じく強い正の相関を示した。

3.4 単位粗骨材の推定

材齢 28 日の供試体で分析を行った。粗骨材の単位量測定に際しても空気量推定と同じように骨材とそれ以外の物質についての二値化が必要となる。しかし、コンクリートのような複合材料ではモルタルと骨材の二値化が図-8 に示すように困難となる。そこで CT 値のヒストグラムから推定を行った(以下ヒストグラム法と称す)。また、本実験のように配合が既知の場合の推定(以下範囲指定による二値化法と称す)についての分析も実施した。

3.4.1 ヒストグラム法

CT 画像の画像解析からヒストグラムが作成される。そのデータを P タイル法および判別分析方法(大津法)により骨材量を推定する¹¹⁾。分析を行う際に閾値を定めその CT 値以上の割合から単位粗骨材量を推定する。閾値の設定には画像から抽出した Plot Profile のグラフと CT 画像の合成図を作成する。合成図を図-9 に示す。図に示す黄線のようにトラバース線を引き、得られた CT 値のグラフ画像と青緑線に示すように始点と終点を合わせた合成処理画像により評価した。さらに精度向上のために供試体中央部にφ50 mmの削孔を施し、その中に該当骨材を投入した Phantom 供試体を作成し CT 撮影を行った。その Phantom 供試体と同時撮影することで、二値化の評価を総合的に判断し閾値を決定した。ファントム供試体を写真-2 に、Phantom 供試体の CT 画像を図-10 に、粗骨材推定ヒストグラムを図-11 に、結果を表-7 に示す。

CT の閾値設定が単位粗骨材量の推定に及ぼす影響は大きい。大津法では大きく乖離したが Phantom 供試体および Plot profile から推定したものは3~15%の誤差であった。石灰系骨材と比べ砂岩系骨材の誤差が大きい傾向となった。モルタルと粗骨材の密度差や骨材周辺部のセメントペースト等の微粒子の状態が二値化の際に影響し誤差を大きくした可能性が考えられる。

3.4.2 範囲指定による二値化法

配(調)合が既知の場合は骨材の容積が占める割合を算出し、その値をモルタル部と骨材部の二値化の際の設定値とすることで分析の解像度が上がる。その際に用いる CT 画像上に X 線照射時に生じたアーチファクトと呼ばれるノイズが発生する。そのノイズの一種類であり、物体の端部が他の部分と比べ CT 値が大きくなるというビームハードニングと称するノイズが発生することが知られている¹²⁾。その対策として分析範囲を絞る直径を 85 mm とすることで精度を高めた。算出方法はスライス毎の粗骨材部分の割合を求め式(5)より算出する。

$$G = \sum_{i=1}^n s_i \cdot \Delta t \cdot \rho_g \quad (5)$$



写真-2 Phantom 供試体 図-8 粗骨材の二値化画像

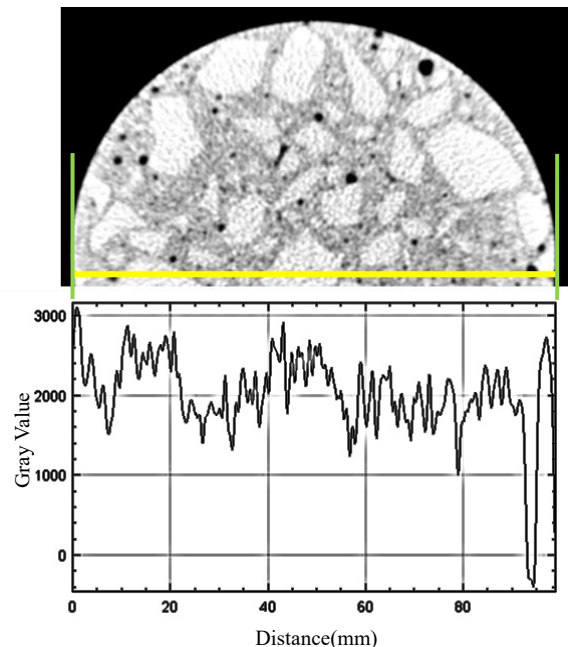


図-9 Plot Profile と CT 画像の合成図

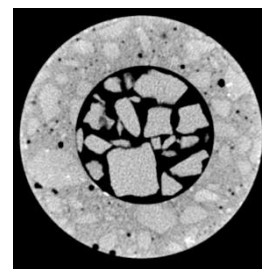


図-10 Phantom 供試体の CT 画像

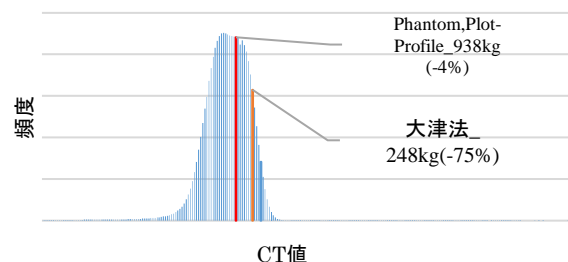


図-11 骨材推定ヒストグラム

ここに、G : 推定粗骨材量(kg/m³)、s_i : 各スライス毎の骨材が占める面積(mm²)、Δt : スライス間隔(mm)、ρ_g : 粗骨材密度(g/cm³)

表-7 単位粗骨材量推定(ヒストグラム法)

配合	推定量(kg/m ³)	誤差(%)
50L	938	-3.9
60L	1026	+6.2
70L	915	-3.3
50S	1033	+9.1
60S	1021	+9.6
70S	1060	+15.7

表-8 単位粗骨材量推定
(範囲指定による二値化法)

配合	推定量(kg/m ³)	誤差(%)
50L	972	-0.4
60L	972	+0.6
70L	983	+3.9
50S	944	-0.3
60S	926	-1.1
70S	899	-2.0

画像解析から得られた結果を表-8 に示す。推定誤差はヒストグラム法に比べ非常に小さい結果となった。アーチファクトの除去及び適切な CT 値の閾値設定が寄与したと推測される。

4. まとめ

本研究では、医療用 X 線 CT スキャナを用いた硬化コンクリートの品質評価についての検証を実施し、以下のような知見を得られた。

- (1)医療用 X 線 CT スキャナは産業用と比べ管電圧等が制限されるために、分解能の低下が懸念されたが、気泡においては 0.5 mm 以上、骨材については 5 mm 程度までの検出が可能であった。CT スキャナの特徴である可視化により骨材のバラつき等を視覚的に捉えることができた。
- (2)空気量推定では、エントラップトエアを推定することができ、その量は W/C が小さい程、誤差が少ない傾向となった。
- (3)圧縮強度および C/W の推定では、骨材の種類および材齢を分けることでモルタル部の CT 値と強い正の相関を示した。
- (4)単位粗骨材の推定では、Phantom 供試体並びに Plot Profiles を適宜用いることで精度を高めることが可能であった。配合が既知の場合は、範囲指定による二値化法を用いノイズを避けることで、さらに精度が向上すると考えられる。

謝辞

本実験の医療用 X 線 CT スキャナの使用においては、高知大学海洋コア国際研究所の共同利用共用システムを利用した。施設利用際し快諾頂いた佐野有司所長、徳山英二前所長および技術支援を頂いた職員各位に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 戸田裕之：X 線 CT-産業・理工学でのトモグラフィー実践活用-, 共立出版, pp.1-6, 2019.2
- 2) 天明敏行, 尾原祐三, 堤知明, 村上祐治：X 線 CT 法による硬化コンクリートの特性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.545-550, 2010
- 3) 天明敏行, 伊藤剛, 濱崎大志, 尾原祐三：X 線 CT 法を用いたコンクリートの材料構成定量化法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.739-744, 2008
- 4) 七山太ら：地震性地殻変動と大規模ラハールによって規制された開析谷埋積シークエンス南海トラフ沿岸, 宿毛臨海低地において採取された沖積コアの解析, 地質学会誌, 第 126 巻, 第 9 号, pp.493-517, 2020.9
- 5) 鬼塚伸介：X 線 CT 第 2 回 CT 画像の基本と画像表示, MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY, Vol.4 pp.258-262, September 2006
- 6) 菊地拓己, 伊藤敏, 井上祥史：ImageJ による画像計測法の評価, 岩手大学教育学部研究年報第 68 巻, pp.65-70, 2009.2
- 7) 多田野渉, 早川慎二郎：微細試料の X 線マイクロ CT 画像解析-ImageJ Fiji を用いた単繊維の開口率および体積の抽出-, アグネ技術センター, X 線分析の進歩 54, pp.119-126, 2023.3
- 8) 杉山隆文, 志村和紀, 畠田大規：高解像度型 X 線 CT による AE モルタル中の空隙構造の透視, 土木学会論文集 E2, Vol.67, No.3, pp.351-360, 2011
- 9) 深谷泰文, 露木尚光：セメント・コンクリート材料科学, 技術書院, pp.151-154, 2003. 10
- 10) 日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要点 23, pp.66-67, 2023.9
- 11) 天明敏行：X 線 CT 法のコンクリート診断への適用に関する基礎的研究, 博士論文, 熊本大学, pp76-81, 2009.3
- 12) 戸田裕之：X 線 CT-産業・理工学でのトモグラフィー実践活用, pp.355-365, 2019.2