# 論文 X線CT法を用いたはつりによるコンクリートの損傷評価

新谷 廉\*1・谷倉 泉\*2・渡邉 晋也\*3・尾原 祐三\*4

要旨:本研究では、劣化したコンクリートを補修する際のブレーカによるはつり工法において、はつり後のコンクリートから採取したコアにX線CT法を適用してコア内部の損傷を評価した。具体的には、ブレーカによってはつりが行われた コンクリートブロックのはつり面にほぼ垂直にコアを採取し、それらにX線CT法を適用し、3次元構成したイメージに 対して画像解析を行い、コア内部の空隙やき裂の状態を定量的に評価した。その結果、空隙やき裂の状態の分布を把握す るとともに、本研究での実験では、ブレーカによるはつりが与える損傷深さは、はつり面から約4cm程度であることを明 らかにした。

キーワード:はつり工法、ブレーカ、X線CT法、画像解析、損傷

## 1. 緒言

近年,建設現場では経年劣化したコンクリートの補修 対策として増厚や断面修復などの既存構造物に新しい材 料を打ち足す工法が採用されている。その際,劣化部は 除去する必要があり,その目的で一般的には重さ 10~ 20kg 前後のハンドブレーカが用いられている。しかし, ブレーカによるはつり工法は大きな振動を伴いコンクリ ート内部にひび割れを生じさせるため,新旧コンクリー トの付着強度が低下するという問題点が挙げられる。ま た,はつり工法が計画されているコンクリートの劣化程 度,劣化深度などを調査する方法も確立されていないの が現状である。

一方、コンクリートの非破壊診断法<sup>1)</sup>としてコンクリ ートの表面の強度を反発度との関連式から算定する反発 度法,超音波を伝搬させ、その速度からコンクリートの 品質、欠陥、ひび割れを調査する超音波法、表面を打撃 し、その超音波形から内部の空隙の欠陥を調査する衝撃 弾性波法、X線を透過させコンクリート内部の空隙など の欠陥を調査する放射線透過法などがあげられる。本研 究で用いるX線CT法は放射線透過法の一つに分類され、 コンクリートの調査診断において安全管理や法規制、コ スト面での制約はあるものの、空隙やひび割れなどの3 次元表示が可能となることから、その有用性が期待<sup>2)</sup>さ れている。しかし、現場で直接使用することができない ため、通常は採取されたコアなどにこの方法を適用して、 コアに対して非破壊的に診断がなされる。

X線 CT 法は、断面画像のX線吸収率を表す CT 値を 分析することにより、物体を構成する各材料の密度分布 の情報が得られるという特徴がある。X線 CT 法を適用 して、これまでにコンクリート中の骨材や空隙、モルタ ル平均 CT 値の鉛直分布に関する研究<sup>3)</sup>,鉄筋周囲の空隙の定量評価に関する研究<sup>4)</sup>,ひび割れ導入モルタルの 自己治癒過程の研究<sup>5)</sup>などが行われている。

本研究の最終目標は, X線 CT 法を用いてコンクリー ト内部のき裂の形状や空隙の定量化法を確立し、各種は つり工法によるコンクリート内部の劣化評価のためのコ ア診断法を構築することである。そこで本研究では、コ ンクリート円柱供試体の1軸圧縮試験の結果に基づいて 確立したコンクリート内部の構造の定量化法 <sup>6),7)</sup>を用い て、はつりコンクリートから採取したコアの内部状態を 把握し、今後実施する非破壊診断の基礎資料とする損傷 の発生状況について検討するものである。具体的には, まず、本研究で用いたマイクロフォーカス X 線 CT スキ ャナについて簡単に説明するとともに、X線 CT 撮影さ れた画像の解析法について述べる。つぎに、打設・養生 したコンクリートブロックをブレーカによってはつった 後,ブロックから採取したコアにX線CT法を適用する。 さらに、再構成した3次元画像に定量化法を適用した分 析結果を示し、はつり工法における内部損傷について得 られた知見を述べる。

#### 2. X線CT スキャナシステム

## 2.1 X線CT装置

X線 CT 法は X線透過法を用いており, 被検体に X線 を照射し, 物体透過前後の X線エネルギー減衰比から透 過した物体内部の X線吸収率の空間分布を数値的に求め, これを画像化するという逆解析手法である。X線吸収率 が物体内部の密度に比例することが知られていることか ら, X線 CT 法は物体内部の密度分布を画像化する技術 とも言える。

- \*1 熊本大学 大学院自然科学研究科 社会環境工学専攻(学生会員)
- \*2 施工技術総合研究所(一社)研究第二部 部長(正会員)

\*4 熊本大学 大学院自然科学研究科 教授

<sup>\*3</sup> 施工技術総合研究所(一社)研究第二部 主任研究員 工博(正会員)

本研究で使用した装置はマイクロフォーカス X 線 CT スキャナである。装置の外観を図-1に,内部の様子 を模式的に図-2に示す<sup>6,7)</sup>。なお,詳細は参考文献を参 照されたい。

## 2.2 X線CT画像とCT値

図-3 にはコンクリートの断面画像を例示する。X 線 CT 法における断面画像はボクセル(voxel)で構成され, 各 ボクセルには CT 値が与えられている。この値の定義は 参考文献<sup>7)</sup>を参照されたい。X 線吸収係数は物体の密度 にほぼ比例するため, CT 値もほぼ密度に比例した値とな る。画像では, CT 値が高い(密度が大きい)場合に白色 に,反対に CT 値が低い(密度が小さい)場合黒色に表 示される。これにより,図-3 のように,視覚的には骨 材,モルタル,空隙が判別できる。

## 3. 画像解析法

## 3.1 解析方法

多くのき裂や空隙を持つ供試体の X 線 CT 画像データ に関して,その3次元構造や形態を分析・評価するため に市販の解析ソフトウェア ExFact(日本ビジュアルサイ エンス)を用いた。このソフトウェアの基本原理は参考 文献<sup>10</sup>に詳しく示されている。

本ソフトウェアを用いると、構造や形態を表す様々な パラメータを得ることができるが、著者らがコンクリー ト供試体の一軸圧縮試験の結果に基づいて本ソフトウェ アを併用して内部の構造の定量化を試みたところ、これ らのパラメータの中で、コンクリートの劣化を表すパラ メータとして Porosity index, Burn number および Medial axis が有効であるとの結果を得ているので、本研究では、 それらの3つのパラメータを用いてコンクリートの損傷 評価を行う。

上記パラメータは図-4 に示すフローチャートのよう な手順で得ることができる。すなわち, X 線 CT 画像を

用いて3次元画像を構成し,空隙を抽出するためのしき い値を3.2で述べるヒストグラム関数3回微分法<sup>8),9)</sup>によ って決定する。つぎに,空隙を表すボクセル数を分析領 域全体のボクセル数で除して3.2で述べる Porosity index を求める。また,空隙の幅を解析するとともに,空隙中 心を結ぶ線を描くことで3.3 に述べる Burn number およ び Medial axis を得る。

## 3.2 しきい値の決定

断面画像の CT 値のヒストグラムを例示すると図-5 のようである。CT 値が高い領域に骨材の値が分布し,低 い領域には空隙やき裂の値,それらの中間の領域にモル タルの値が分布している。ExFactを用いて空隙やき裂の 情報を分析するためには,このヒストグラムから空隙や き裂だけの情報を抽出する必要がある。そこで,それら の CT 値とモルタルや骨材の CT 値と分離するための境 界 CT 値(しきい値)を設定する。

本研究では、しきい値を決定するためにヒストグラム 関数3回微分法<sup>8),9)</sup>を用いた。この方法を用いることに よって、客観的にしきい値を決定できる。

#### 3. 3 Porosity index

CT 値を 65536 諧調(16bit)とし,上記の方法でしきい値 を決定し,空隙あるいはき裂ボクセルと他材料ボクセル の2 値化画像とした。分析領域における空隙あるいはき 裂のボクセル数を総ボクセル数で割ることで空隙率を算 定した。ここで得られる値は,実際の空隙率とは異なる ものの,それに対応したパラメータであり, Porosity index と呼ぶ。

## 3. 4 Burn number および Medial axis

Burn number とは空隙の大きさやき裂の幅を示す値で ある。図-6に示す CT 画像の拡大図を用いて簡単に説明 すると、空隙やき裂を挟む材料と隣り合っている空隙側







図-2 マイクロフォーカス X 線 CT スキャナの構造



図-3 コンクリートのX線CT画像

ボクセルに Burn number として1を与え、つぎに1に隣 り合っている空隙のボクセルに2を与える。これを繰り 返すと、Burn number は材料から遠いほど大きい値とな る。したがって、空隙を挟む材料の距離を示す指標とな る。すなわち、空隙の大きさあるいはき裂の幅を示す。

図-6には Medial axis (空隙中心軸) も示されている。 これは図中の実線で示され,空隙やき裂の中心を結んだ 線で,長いほど空隙やき裂は連続していることを示す。 Medial axis は球であればその中心を通り,円柱であれば 水平断面の中心を通る回転中心軸に相当する。なお,こ の情報は Burn algorithm<sup>10</sup>)によって求められる。

## 4. はつりコンクリートブロックの損傷評価

#### 4.1 コア供試体

本研究では、はつり手法としてブレーカを使用してコ ンクリートブロックを作成し、はつり後のブロックから コア供試体を採取し分析を行った。はつり用コンクリー トブロックの配合を表-1 に示す。寸法は 40cm×40cm×11cmとした。5日間湿潤養生した後に気中 養生を行い,打設後28日で図-7に示すように,ブレー カ(ここでは、ピックハンマーの7.3kgを使用)を用い て、30cm×30cm(ブロックの色が塗られた部分)を深さ 約2cmではつり処理を施した。ブロックは24体作成し たが、図-8(a)に示すように、そのうちの1体のブロッ クのはつり面からボーリングによって直径50mmのコア 供試体を計6本作成し、それぞれ供試体BR1~BR6とし た。コア供試体の1例を図-8(b)に示す。

なお,コンクリートブロックのブリーディングや打設 上面の乾燥によるコンクリート内部の状態を把握するた めに,はつり前のブロックからコアを採取し,はつり後 に採取した BR1~BR6 と同様な手順で分析を行った。こ のコアを CB0 と呼ぶこととする。



表-1 コンクリート供試体の配合

## 4. 2 X線CT撮影と分析領域

コンクリートの内部構造を分析するために,採取した 供試体をスライス厚さ 50µm, はつり面(CB0 について は打設上面)から 1800 断面(約 90mm)のX線CT撮影 を行った。分析は 図-9(a)のように,はつり面(BR0 に ついては打設上面)から供試体の底面に向かって7つの 深さ Depth1 ~ Depth7(CB0 については Depth9 まで)に 分けて行う。また、図-9(b)に示すように、各深さにお いて 5 つの area に分割して分析し、得られた Porosity index は 5 つの領域の平均値として示す。各 area は 1 辺 の長さが 11mm の立方体であり、220 枚の断面画像で構 成されている。この時、立方体は一辺 50µm のボクセル 約 1065 万個で構成されている。

## 4.3 はつり面の状態とはつり面近傍の損傷

はつり面の様子を図—10に示す。表面には露出した粗 骨材が多くみられ,骨材自体の破損はほとんど見られな い。一方,骨材とモルタルの境界部にき裂が見られるが, はつり表面に現れる全ての骨材周辺に観測されているわ けではない。このように,はつり表面の観測だけではは つりがコンクリートの深部に及ぼす影響を調査・分析す ることは困難である。

そこで, BR3 のはつり面直下の分析領域の3次元再構 成画像を図-11 に示す。空隙,モルタル骨材に加えて, 黒い線で示されるき裂を見ることができる。そのき裂は 骨材とモルタルの境界に沿ってモルタル内に発生してい ることがわかる。

そこで、この分析領域の Medial axis の分布を図-12

に示す。Medial axis は、カラーの線分量で表示され、3 次元的な位置関係および幾何学的情報を示している。暖 色系が空隙の幅が小さいこと、寒色系は幅が大きいこと を意味している。図によると粗骨材の周辺に少し幅の大 きいき裂と幅の小さなき裂が連続的に繋がり、ひとつの 面を構成しているように見て取ることができる。

つぎに、本分析領域の Burn number の分布を示すと図 -13 のようである。Burn number が1 のき裂が最も多く、 その値、すなわち幅が大きくなると減少している。Burn number が1 とは分析可能な最も小さな空隙あるいはき 裂であり、その大きさ(幅)はボクセル寸法である 50µm 程度である。したがって、本方法を用いると小さな幅を 持つき裂を3 次元的に可視化するとともに、定量的にも 評価することが可能であることがわかる。

#### 4. 4 分析結果と考察

まず, CB0 における Porosity index および Burn number が1の分析例を図-14 に示す。両図ともに縦軸は打設表 面からの深度であり, 横軸はそれぞれ Porosity index, ボ クセル数を示している。Porosity index は5つの area の値 をプロットするとともに,その平均値も合わせてプロッ トした。一方,ボクセル数は同じ depth の各 area の Burn number が 1 のボクセル数を足し合わせたものである。 Porosity index は深度ごとにばらついて分布している。ま た,平均値も一様ではない。これは打設時のコンクリー ト内の残存空気量が関係していると考えられる。一方, 深さ方向の Burn number が1の分布は,全体的にボクセ ル数は少なく,表面近くで大きな値を示しているが,市





図-10 はつり面の様子





図-11 3次元再構成画像



深くなるとほぼ一様に分布していると見なすことができ る。ここで評価される Burn number 1 はき裂ではなく, 小さな空隙であり,それらが表面近くに多く分布してい ることがわかる。これらをまとめると,実験に用いたコ ンクリートブロックは適切に作成され,打設表面近くに 小さな空隙が多数存在するという影響はあるものの,そ の深さは2 cm以下とみなすことができる。本実験でのブ レーカによるはつり深さは約2 cmであるので,はつり後 のコンクリート内部の分析を行う場合には,ブリーディ ングや打設上面の乾燥による影響はあまり考慮しなくて もよいと考えられる。なお,CB0を採取したブロックは, はつり後にコア採取したブロックとは異なっているが, 試験に用いたコンクリートブロックは同様な状態で打設 されたとして議論を進める。

さて,はつり後の BR4 における Porosity index および Burn number 1 の分析例を図-15 に示す。両図ともに図 -14 と同様に描いている。ただし,縦軸はつり面からの 深度であることに注意して頂きたい。はつり面近くの深 度ではともに大きな値を示しているが,深度が大きくな るとある深度まで漸減していることがわかる。

つぎに,6本の供試体の Porosity index を図-16 に示す。 深度ごとの 5 つの area の平均値を Depth 7 の値で正規化 した Porosity index を示す。供試体ごとに多少ばらつきは



あるものの, Depth1 の Porosity index が大きいことがわか る。また, Porosity index は, はつり面から深くなるにつ れて小さくなるが, 平均値をみると Depth4 を超えると大 きな減少は見られず, ほぼ一定となっている。CB0 の結 果では Porosity index の分布は打設時の空隙の分布であ り, 一様ではなかった。これを考慮すると, Porosity index の分布から損傷によって空隙が増加したとは言い難い。

つぎに、Burn number 1の深さ方向分布を図-17に示 す。深度ごとの5つの area の足し合わせた Burn number が 1の値を Depth 7の値で正規化している。あわせて平 均値も示している。ほとんどのコアの Burn number がは つり面から一番近い領域、Depth1において大きな値をと り、はつり面から離れるにしたがってボクセル数が減少 し、Depth4 あるは5を超えるとほぼ一定の値となってい る。CB0 での結果を考慮すると、はつり面以深の Burn number 1 の分布はほぼ一様であったので、一定の値を示 す深さでのコンクリートにはき裂の発生はほとんどない と考えられる。前述したように Burn number が 1 という のは、0.1mm 以下の微小き裂と考えられるので、ブレー カによるはつり処理の振動がコンクリートのはつり面の 深部に損傷を与え、特に直下で著しく、さらに深い場所 にもわずかに損傷を生じさせていると考えられる。

最後に、Medial axisの例としてBR1のDepth1~4の結果を 図-18に示す。Depth1では、暖色の線がつながってある 領域に集中している。一方、はつり面から離れていくに したがって線のつながりが見られなくなっていく。とく に、Depth4に注目すると、寒色系の大きな空隙が見られ、 その周辺に暖色系の線が集まっている。これは、コンク リート打設時の空隙の周りに小さなき裂が多く発生して いることを表している。これらの結果からはつり処理に よる微小き裂は応力の集中しやすい空隙の周りに発生し やすいことがわかる。また、紙面の都合上結果は記載で きないが、モルタル内部や骨材とモルタルの境界部分に 微小き裂が多く発生していることも確かめられている。

これらの結果を総合すると、ブレーカによるはつりは、 はつり面より深いコンクリートにも損傷を与えていると 考えられる。今回の実験では、はつり面から深度約4cm の部分までの範囲で微小き裂が発生し、コンクリート打 設時から存在する空隙の周りや骨材とモルタルの境界部 分に発生しやすいことを明らかとなった。

## 5. 結言

本研究では、ブレーカによるはつり工法がコンクリー トに与える影響を検討するために、はつり試験を行った コンクリートブロックからコアを採取し、これにX線CT 法を適用してコンクリート内部の空隙情報を抽出・分析 を行った。本研究で得られた結果はつぎのとおりである。

- ① はつりによるき裂は、コンクリート打設時から存 在する空隙の周りやモルタルや骨材とモルタルの 境界部分に発生しやすいことを明らかにした。
- ② ブレーカによるはつりは、はつり面より深いコン クリートにも損傷を与えていることを明らかにした。今回の実験では、はつり面から深度約4cmの部 分までの範囲でき裂が発生していた。
- ③ X線CT画像に基づいた画像解析法は、空隙やき裂の 定量化および状態の把握を非破壊で行うことができ、 損傷の評価に有効であることを明らかにした。

## 参考文献

- 日経BP社: 図解 維持補修に強くなる(第2回),精 度を踏まえて複数の検査を併用,日経コンストラクシ ョン(514), pp.66-69, 2011.
- 2) 社団法人日本コンクリート工学協会:コンクリート診 断技術,基礎編,社団法人日本コンクリート工学協会, pp.139,2007.
- T.Temmyo, T.Tsutsumi, Y.Murakami, Y.obara: Estimation of RCD by an X-ray CT method, Proc Geo-X2003, Rocks, pp.199-205, 2003.
- 2) 池田隆徳・濱田秀則・佐川康貴・多田昂平:鉄筋周囲 に形成される空隙のX線CTスキャナによる定量評価、 コンクリート工学年次論文集, vol.33, No.1, pp.1085-1090, 2011.
- 5) 人見尚・片岡弘安:ひび割れ導入モルタルのX線CTに よる自己治癒過程の研究, コンクリート工学年次論文 集, vol.33, No.1, pp.1427-1432, 2011.
- 6) 鄭慈恵,濱地亮,尾原祐三,施工研 谷倉泉,渡辺晋 也:X線CT法による繰り返し載荷試験下での供試体の 損傷分析,資源・素材学会春季大会,2014.
- Jung, J., Hamachi, M., Obara, Y., Tanikura, I., Watanabe, S. : Analysis of damage in specimen under cyclic uniaxial loading test by X-ray CT method, Proc. 8th ARMS, Sapporo, Japan, PR5-4, 2014.
- 8)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, 熊本大学大学院自然科学研究科博士 論文, 第4章, 2009.
- 9) 新谷廉, 尾原祐三, 谷倉泉, 渡邉晋也: X線CT法を用 いたはつりによるコンクリートの損傷評価, 資源・素 材学会平成27年度九州支部例会講演会, 2015.
- 10) Lindquist, W.B., Lee, S.-M. Coker, D.A, Jones, K.W., P. Spanne: Medial axis analysis of void structure in three-dimensional tomographic images of porous media Journal of Geophysical Research, Vol.101, B4, pp.8297-8310, 1996.