# 論文 X線 CT 法を用いた鉄筋埋設モルタルのひび割れおよび電食試験によ る腐食鉄筋の観察

高橋 駿人\*1・志村 和紀\*2・杉山 隆文\*3・田中 大之4

要旨:鉄筋を埋設した円柱モルタル供試体に曲げひび割れを導入し,X線CT法を用いて撮影を行った。取得 した断面画像を処理することにより,鉄筋およびひび割れを的確に抽出することができ,ひび割れ幅の分布 を解析することができた。また電食試験により鉄筋を腐食させて撮影を行い,腐食前後の鉄筋を抽出した各 断面画像から断面積を算出してひび割れ部の断面欠損のプロファイルが得ることができた。さらに腐食後の 鉄筋周辺を拡大して撮影し輝度値のラインプロファイルから,腐食生成物の抽出および考察を加えた。 キーワード:X線CT法,曲げひび割れ,鉄筋腐食,閾値,断面減少量,ラインプロファイル

#### 1. はじめに

コンクリート構造物は、荷重や環境条件など様々な原 因によりひび割れが発生する。ひび割れは水分、炭酸ガ ス,酸素,塩化物などの物質の侵入経路となり、コンク リートの耐久性の低下につながるため、その性状を把握 し制御することは、コンクリート構造物の要求性能を確 保する上で重要である。しかし、ひび割れは通常コンク リート表面における性状を把握できるのみであり、内部 ひび割れについてはコアを採取するなど破壊を伴う方法 で観察することになり、その際に二次的なひび割れが発 生する危険性が伴う。また内部鉄筋の腐食についても、 コンクリート表面における鉄筋方向の腐食ひび割れ、あ るいは錆汁の発生により判断することになる。非破壊検 査法として,自然電位法や分極抵抗法などの電気化学的 手法が発展してきているが、コンクリートの環境条件に 大きく影響を受けることもあり <sup>1)</sup>, 信頼性の高い定量的 な手法には至っていない。したがって、非破壊検査によ りコンクリート内部のひび割れ性状および鉄筋の状態を 把握することは、コンクリート構造物の耐久性を確保し、 適切に維持管理する際に重要である。

非破壊検査法の一つに X 線を用いる手法がある。近年 では X 線技術を用いてコンクリート内部の微細構造に注 目している研究が増えている。例えば造影剤を用いた微 細ひび割れ検出<sup>2)</sup>, X 線 CT 法を用いた気泡分布の観察<sup>3)</sup> やひび割れ中の物質移動の解明<sup>4)</sup>などの報告例がある。 X 線 CT 法は実構造物への応用には課題は多いが,構成 情報の抽出の報告<sup>5)</sup>のように内部状態をありのままに把 握出来るため有望な診断法である。しかし,鉄筋を有す る供試体を用いた観察事例は見当たらない。その原因と しては,従来装置では鉄とコンクリートの密度差が大き いために強いアーチファクト(偽像)が発生し,鮮明な画 像を取得することが困難であったことにある<sup>9</sup>。しかし, 近年では装置の性能も向上しているため,鉄筋が埋め込 まれたコンクリートの X線 CT 撮影も可能と考えられる <sup>7)</sup>。本報告では,鉄筋を埋設したモルタル供試体に曲げひ び割れを導入し,マイクロフォーカス X線 CT 装置によ る撮影を行った後に,鉄筋およびひび割れをそれぞれ抽 出することを目的とした。さらに,供試体に電食試験を 行うことにより鉄筋の腐食を発生させ,X線 CT 法によ る腐食生成物の抽出を試みた。

#### 2. 実験概要

# 2.1 供試体緒元

使用した供試体は普通ポルドラントセメントを使用した水セメント比 0.5 の円柱モルタル供試体(φ55×200mm)で, D10 異形棒鋼を上部かぶりが 12mm となるように配置した。供試体は X 線 CT 撮影の際にアーチファクトの発生しにくい円形断面とし,抽出する物質の種類を少なくするためモルタルを用いることとした。養生後中央1点載荷の3点曲げ試験により曲げひび割れを導入したが, 圧縮側にもひび割れが発生した。圧縮強度は42.4N/mm<sup>2</sup>であった。図-1に供試体の概要を示す。



\*1 北海道大学大学院工学院 環境フィールド工学専攻 (学生会員) \*2 北海道大学大学院工学研究院 環境フィールド工学部門 博士(工学)(正会員) \*3 北海道大学大学院工学研究院 環境フィールド工学部門 Ph.D(正会員) \*4 (地独)北海道立総合研究機構 材料技術部 研究主幹

## 2.2 電食試験

鉄筋腐食を発生させるため、電食試験を図-2のよう に行った。曲げひび割れ部に対して不織布を巻きつけ、 その下部にスポンジと銅板を設置する。3%NaCl 水溶液 をスポンジの高さまで浸漬させ、陽極を鉄筋に、陰極を 銅板に接続して定電流試験を行った。電流は0.15Aとし、 24時間通電した。

# 2.3 X 線 CT 撮影

# (1) X 線 CT 装置

図-3 に使用したマイクロフォーカス X 線 CT 装置の 概要を示す。X 線発生装置から X 線が照射され,供試体 を透過後に検出器が透過画像を取得する。供試体設置用 のテーブルが撮影中に 360°回転することにより,全ての 方向から撮影され,コンピュータによる再構成処理によ り,供試体の断面画像を積み重ねた撮影データが得られ る。

本装置の仕様は,X線発生装置については最大管電圧 が225kV,最大管電流が1000µA,定格出力が135Wであ り,X線検出器にはX線フラットパネルを使用しており, 入力視野寸法は8.0×8.0インチ,有効画素が1000×1000ピ クセル,検出素子サイズが200µmとなっている。

#### (2) 撮影条件

撮影は X 線装置の電源条件が管電圧 200kV, 管電流 100µA で行い, 解像度は画素数が 2048×2048 ピクセル, 1 ピクセルのサイズは 31µm であり, 1 スライスの厚さも 31µm である。スライス数は 1776 枚であった。腐食後の 供試体については, 鉄筋周辺を拡大した撮影も行った。

#### 3. 実験結果及び考察

## 3.1 取得断面画像

軸を図-4のように設定し、曲げひび割れ導入後の X-Y 断面および Y-Z 断面画像を取得した。取得した断面画 像を図-5 に示す。これによれば X 線 CT 断面画像によ り、供試体内部の鉄筋、ひび割れがそれぞれ確認でき、 鉄筋周辺にアーチファクトもほとんど発生していないこ とが示された。しかし腐食前後の撮影で撮影範囲を一致 させることができなかった。今後の撮影の際に固定冶具 の改良や,供試体にマーカーを埋設するなどの工夫をし、 経時測定の精度を上げる必要がある。

この画像を基に鉄筋およびひび割れの抽出を行った。 なお画像処理は主に ImageJ<sup>8)</sup>,輝度変換およびクラスタ ーラベリングについては slice プログラム <sup>9</sup>を用いた。

# 3.2 鉄筋およびひび割れの抽出

背景による影響を排除するため関心領域を決定した。 関心領域は直径 1750 ピクセル(54.25mm)で曲げひび割れ 付近の断面 1200 枚(37.2mm)の円柱状とした。図-6 に関 心領域を三次元化した画像を示す。



図-3 マイクロフォーカス X 線 CT 装置の概要



図-4 供試体の軸設定



図-5 供試体の断面画像

図-7 に供試体の関心領域の輝度のヒストグラムを示 す。これを基に各構成物質の輝度の閾値を決定する。閾 値の決定方法は著者らによる,ピークに対する稜線の延 長線上と輝度(X)軸との交点を閾値とみなす方法を用い た。<sup>10</sup>。図より輝度が 40000 周辺で大きなピークが存在 し、51000 周辺に小さなピークが存在した。小さなピー クは右上に拡大して表示した。大ピークはモルタル,小 ピークは鉄筋にそれぞれ由来していると判断した。各ピ ークに対して稜線を描き,軸上との交点(輝度 39000, 49500)を閾値として決定し, 0~39000 を空隙, 39001~49500 をモルタル,49501~65535 を鉄筋に該当す る輝度の範囲であると判断した。鉄筋の閾値により断面 画像を二値化し,三次元化したものを図-8 に示す。鉄 筋表面の形状が再現できており,CT 断面画像から鉄筋 を抽出することができた。空隙の閾値より断面画像を二



図-6 関心領域の三次元画像

値化し、三次元化したものを図-9(a)に示す。供試体中 の空隙に相当する部分が全て描かれている。この空隙の 二値化画像に対してクラスターラベリングを行い、空隙 の中で一番大きな体積を持つものをひび割れと考え、三 次元化したものを図-9(b)に示す。鉄筋のまわりから発 生したシェル状のものとして表されている。図-10に抽 出した鉄筋とひび割れを合成した画像を示す。なお識別 のために鉄筋を青色で表した。これによれば、鉄筋表面 に沿ってひび割れが生じている部分があり、付着ひび割 れが表現されている。このように、異なる閾値で二値化 した画像を合成することにより、一般的に行われる単一 の階調処理では得られない情報を得ることができる。

また,ひび割れ画像から,その幅の分布を解析するプ ログラムを用いて厚さを色の相違で表したものを図-11 に示す。これによればひび割れ上部から下方の引張縁に



図-8 抽出した鉄筋の三次元画像



図-7 輝度のヒストグラム



(a)空隙(ひび割れを含む)

(b)ひび割れ

図-9 抽出した空隙の三次元画像



図-10 ひび割れと鉄筋を合成した三次元画像

向かって幅が増大して行くことが認められ,曲げひび割 れの特徴が表現できている。

# 3.3 鉄筋の腐食性状

# (1) 断面減少量

電食試験後の供試体について X 線 CT 撮影を行った。 腐食前後で鉄筋を抽出し,各断面画像の断面積を算出した。腐食前後の断面積および前後の差分を表したものを 図-12に示す。腐食前の断面積の平均は64.5mm<sup>2</sup>となり, D10 異形棒鋼の断面積の実測値は 67.6mm<sup>2</sup>であったことから,鉄筋の抽出はほぼ妥当であったと考えられる。また腐食前後の断面積の差分をとったところ,ひび割れ部以外でほぼ一定の値が生じた。これは腐食後の供試体を 割裂した結果,ほぼ全長に渡って黒錆が確認されており, この影響によるものと考えられる。また,ひび割れ部で 鉄筋の断面が大きく欠損している部分では,最大 29.6% の断面欠損が生じていた。図-13 に腐食後の鉄筋を抽出 し三次元した画像を示すが,図-12 の断面減少量の傾向



図-11 腐食前 NC 供試体の曲げひび割れ幅の分布





と一致していると言える。

(2) ラインプロファイル

鉄筋の最大腐食部を拡大して撮影を行った断面画像 を図-14(a)に示す。これによれば鉄筋の周りに層状のも のがあり、断面の欠損部分に密度の低い部分がある。モ ルタル部から鉄筋を通過するような右肩上がりの線分を 描き,図中のように原点から一番近い層状の点を A,鉄 筋部の点を B,鉄筋通過直後の点を C,欠損部の密度の 低い点を D, 原点から一番遠い層状の点を E と設定した。 描いた線分上における輝度のラインプロファイルを図ー 14(b)に示す。これによると図のように A は層状物質の ピーク, Bは鉄筋のピークに相当し, CとDを比較する と、欠損部と思われる D はかなり輝度が落ちており、E で再び層状物質のピークが見られる。これは鉄筋に近い C点は腐食生成物が生じているが、D点は腐食生成物が 水分と共にひび割れ部から流出し、空隙となっていると 考えられる。また鉄筋部である B 点の近傍は輝度が低下 している。これは、鉄筋中心部までは X 線が透過しない ために生じるビームハードニングによるものと考えられ る。A, Eの層状の点は比較的ピークが強くなっている。 これは腐食生成物の中でも密度が大きい Magnetite<sup>11)</sup>と 考えられる。電食試験後に供試体を割って確認した際に, ひび割れに浸出していた錆汁が赤色であったのに対して 鉄筋周辺のモルタル部が黒色化していた。これは黒錆で ある Magnetite であると判断した。また輝度の範囲は 43000から 47000 程度であると判断し、この値を用いて 腐食生成物の抽出を試みることとした。

#### (3) 腐食生成物の抽出

輝度のラインプロファイルに基づく腐食生成物の抽 出の妥当性を検討する。図-15 に鉄筋腐食後の NC 供試 体を拡大して撮影した断面画像の腐食生成物抽出前後及 び差画像による比較を示す。差画像とは各ピクセル位置 の元画像の画素値から抽出画像の画素値の差分をとって 表示した画像である。これによると鉄筋内の健全部と腐



図-13 抽出した腐食後の鉄筋の三次元画像



(a) 鉄筋腐食部を拡大した断面画像



(b) 輝度のラインプロファイル図-14 鉄筋周りの腐食生成物



図-15 画像によるラインプロファイルの結果の比較



図-16 ひび割れ, 腐食生成物, 鉄筋を抽出した 三次元画像

食領域及び空隙部周辺の腐食領域までが概ね抽出できて いるが画像上部に腐食領域とは思われない領域も見受け られる。また空隙,腐食生成物,鉄筋を合成した三次元 画像を図-16に示す。これによると鉄筋周辺の腐食およ びひび割れ部に腐食生成物が浸出している様子が描けて いる。また腐食による鉄筋軸方向のひび割れが発生して いる様子が描けている。以上よりラインプロファイルに よる腐食生成物の輝度の範囲はある程度妥当であると言 えるが,X線回折などの他の手法を用いて腐食生成物の 特定を行うことも必要と考えられる。

# 4. まとめ

本報告はひび割れを有する鉄筋を埋設したモルタル 供試体に X 線 CT 法を適用して,ひび割れと鉄筋の抽出 を行った。また電食試験により鉄筋を腐食させて撮影し, 鉄筋腐食に関する考察を行った。以下に本報告で得られ た知見及び今後の課題を示す。

- 検出器の向上により鉄筋を有する供試体に対して も金属アーチファクトがほとんど発生することな く撮影できたため、X線CT法の適用が可能である。
- ヒストグラムから閾値を決定し、二値化処理を行う ことでひび割れおよび鉄筋が抽出でき、またひび割 れ幅の分布も明らかにすることができた。腐食生成 物に関しても概ね抽出できたが、X線回折法などの 他の手法を用いて腐食生成物を特定することが必 要である。
- 腐食前後で抽出した鉄筋の各断面画像の面積を算 出して比較することで断面減少量を得ることがで きた。またひび割れ部の最大断面減少率は29.6%で あった。
- 今後はX線CT法を用いて、電食試験の条件や、ひび割

れの発生条件などを変化させ、腐食機構の違いを明らか にしていくことを課題とする。

謝辞:本研究は,科学研究費補助金(基盤研究 B 課題番号 26289133) を受けて実施した研究成果の一部である。 また実験の際に Idrees Zafar 博士(北海道大学大学院)に協力をいただいたことに謝意を表す。

# 参考文献

- 1) Uomoto, T.: Corrosion of Rebars under Different Conditions, コンクリート工学年次論文集, Vol.12, No.1, pp.825-830, 1991
- 大塚浩司:X線造影撮影による鉄筋コンクリート内部の微細ひびわれ検出に関する研究,土木学会論文集,No.451,V-17,pp.169-178,1992.8
- 杉山隆文,志村和紀, Promentilla, M. A. B., 畠田大 規:X線 CT 法による AE モルタル中の気泡分布観 察,コンクリート構造物の補修,補強,アップグレ ード論文報告集第8巻, pp.99-104, 2008.10
- 池田昇平,杉山隆文,吉川昴純,志村和紀:炭酸セシウムをトレーサーとした X線 CT によるひび割れ中の物質移動の解明,コンクリート構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集第 12 巻, pp.207-214,2012.11
- 5) 若木伸也,高橋良和,澤田純男:X線CT法を用い たコンクリート円柱供試体の内部構成情報の抽出, 土木学会論文集,Vol.65,No.1, pp.399-405, 2009
- 6) 池田隆徳,濱田秀則,佐川康貴,多田昴平: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.
- 高辻利之:計測用 X 線 CT の発展,検査技術, pp.6-11, 2016.3
- Rasband, W.S., ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, http://rsb.info.nih.gov/ij/, 1997-2012.
- 9) 中野司, 土、山明, 上杉健太郎, 上椙真之, 篠原邦夫 (2006) "Slice" -Softwares for basic 3-D analysis-, Slice Home Page (web), http://www-bl20.spring8.or.jp/slice/, 財団法人 高輝度光科学研究センター
- 10) 高橋駿人,土生侑祐,志村和紀,杉山隆文:X線CT 法を利用した気泡分布測定,コンクリート中の気泡 の役割・制御に関するシンポジウム,pp.59-64,2015.6
- 高谷哲、中村士郎、山本貴士、宮川豊章:コンクリート中の鉄筋の腐食生成物の違いがひび割れ発生 腐食量に与える影響、土木学会論文集, Vol.69, No.2, pp.154-165, 2013