

論文 X 線 CT を用いたはつりによる鉄筋付着切れ評価に関する検討

渡邊 晋也*1・内田 美生*2・谷倉 泉*3・尾原 祐三*4

要旨：本研究では、補修・補強工事で実施される既設コンクリートのはつり工で発生する鉄筋とコンクリートの付着切れに着目し、その評価を X 線 CT の 3 次元画像を用いて分析を行った。具体的には、ハンドブレーカを用いて鉄筋コンクリートのはつりを実施し、そこから鉄筋を含む試験体を採取して X 線 CT 法を適用し、画像解析を行った。その結果、X 線 CT 法を用いることで、従来評価ができなかった鉄筋とコンクリートの付着切れについて可視化することが可能であることを明らかにした。また、X 線 CT 法によりコンクリート内部の微細なひび割れなど空隙を有する領域や、密度が低い領域などの評価も可能であることを示した。

キーワード：X 線 CT 法、鉄筋付着切れ、はつり工法、ブレーカ工法

1. はじめに

コンクリート構造物に発生する変状には、初期欠陥をはじめ、材料の劣化や外力による構造的な劣化など、使用材料や供用環境によって多種多様な変状がある。このような変状を見逃さずに確実に調査するためには、目的に適した調査方法を選定するとともに、構造物や変状の特徴をよく把握して望むことが重要である。

また、これらの変状部をはつり処理するウォータージェット工法（以降 **WJ** 工法と称す）とブレーカ工法については、それぞれの使用目的や機械設備も異なるため、活用の方法や研究開発の経緯も大きく異なっている。近年は、我が国においても欧米と同様に研究が進み、両者の長所や短所が広く認識されてきつつある。現状では、新しくコンクリートを打継いで新旧コンクリートの一体化を図るような場合、**WJ** 工法は良好な成果が期待される一方で、ブレーカ工法は十分な効果が期待できないことも指摘されている¹⁾。しかし、その原因についての工学的な研究はまだ十分ではなく、緒についた段階だと思われる。このような中、岩盤や地盤内のひび割れや空隙の調査、研究に利用されている X

線 CT 法に着目すると、この方法を用いた画像解析を行えば、X 線が透過する構造物内部の状態を細かく捉えられることから、コンクリート内部の微細ひび割れの分布や発生状況についても分析できることがわかってきた²⁾。そこで、コンクリートのはつり工で用いられるブレーカ工法と **WJ** 工法の影響についてコンクリート内部で生じている現象を把握するために X 線 CT 法を用いて検討を実施している。本論文はブレーカ工法が鉄筋コンクリートにあたえる損傷を解明する研究であり、鉄筋コンクリート版をはつり処理を行って鉄筋を含む円柱コア供試体を採取し、X 線 CT 法を適用した。取得された 3 次元画像から鉄筋周りの空隙を可視化し、鉄筋とコンクリートとの境界面に生じた付着切れを評価した結果を取りまとめたものである。

2. X 線 CT システムおよび分析方法

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

1) (一社) 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 研究第二部 副主幹 博士 (工学)

2) (一社) 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 研究第二部 技術主幹 博士 (工学)

3) (一社) 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 技師長 博士 (工学)

4) 熊本県立技術短期大学校 校長 工博

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。本研究で使用した装置は産業用 X 線 CT スキャナであり、株式会社ニコンインステックの産業用 X 線 CT スキャナ(XTH320)を用いた。装置の外観を写真-1 に、内部の様子を模式的に図-1 に示す。本研究で適用した装置の概要は次のとおりである。最大出力 230kV/500 μ A が可能な X 線管と、検出器としてフラットパネルディテクター(FPD)を装備し、画像の画素数は、 $n=512 \times 512$, 1024×1024 , 2048×2048 の 3 通りに設定が可能である。コーンビーム撮影モードでは、対象試料の 3 次元画像を一回の撮影で収集することが可能である。拡大率はテーブル位置を調節することにより任意に設定を変更することができ、1 画素の辺長をスキャンモードで最小 $4 \mu\text{m}$ の画素寸法で撮影が可能である。

2.2 X 線 CT 画像と CT 値

図-2 に鉄筋コンクリートの断面画像例を示す。一般的に平面画像はピクセル(pixel)で構成されているが、X 線 CT 法における断面画像はボクセル(voxel)で構成されており、図-3 の CT 画像の模式図に示すようにスライス厚分の高さを持つ 3 次元の画像となっている。本研究では一画素サイズおよびスライス厚を $30 \mu\text{m}$ に設定し撮影を行った。

各ボクセルには、次式で表わされる CT 値がそれぞれ与えられている。

$$\text{CT 値} = S\mu + B \quad (1)$$

ここで、 S =スロープ、 B =バイアス、 μ =X 線吸収係数を示す。X 線吸収係数 μ 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。したがって、画像では、CT 値が高い(密度が大きい)場合は白色に、反対に CT 値が低い(密度が小さい)場合は黒色に表示される。これにより、図-2 のように、骨材、モルタル、空隙、鉄筋が視覚的に判別できる。



写真-1 使用した産業用 CT スキャナ

(株式会社ニコンインステック HP より引用)

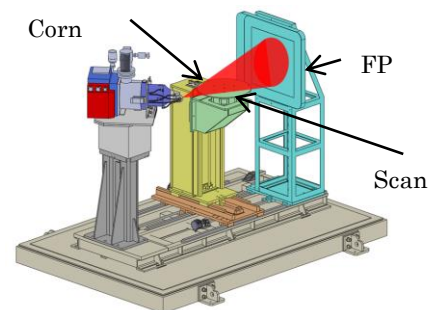


図-1 X 線装置の構造

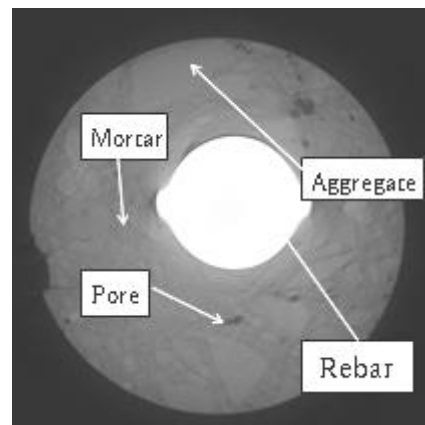


図-2 鉄筋コンクリートの X 線 CT 画像

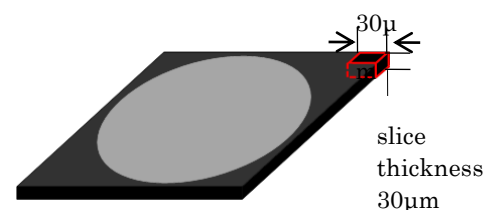


図-3 CT 画像の模式図

2.3 評価方法

ひび割れや空隙を持つ試験体の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・評価するために画像処理ソフトウェアを用いた。解析手順として、産業用X線CTスキャナで撮影したスキャン画像を画像処理ソフトにより重ね合わせ、つながった画像にする。撮影されたばかりの画像は、1枚ずつの画像が1画素サイズの枚数分データとして得ることができるが、それぞれの画像を立体的に縦方向につなぎ合わせていくことでスキャン画像を3次的に表すことができる。また、つなぎ合わせた画像のしきい値を求めることによりコンクリートの空隙部分だけを抽出していく。今回はしきい値の決定方法として、空隙部分だけ分かりやすく赤く染色した。なお、しきい値の設定方法については、2.4に記載する。求めたしきい値を用いて空隙部分だけを抽出し、別ソフトを用いて3次元化した。3次元化したものが図-4になる。この解析手法により、内部の様子も3次元で可視化することが可能となる。

2.4 しきい値の決定

X線CT法のしきい値とは空隙、モルタル、骨材とをCT値の違いによって分類した際の区切りの値であり、CT画像を解析するにあたり重要な値である。撮影状況、供試体によりCT値は異なるためしきい値は一定にはならない。そこで本研究のしきい値の決定方法として、約2000枚のスキャン画像を50枚ずつに分け、空隙、モルタル、骨材が鮮明になるしきい値を求め、その平均値をしきい値として用いた。実際に空隙部分だけを赤く染色したのが図-5になる。鉄筋とコンクリートの境界面の損傷を見やすくするため、境界面付近以外は表記していない。図-6に本試験で用いたしきい値を示す。なお、低強度コンクリートであるNo.2の試験体は高強度コンクリートのしきい値より小さいことが判明した。

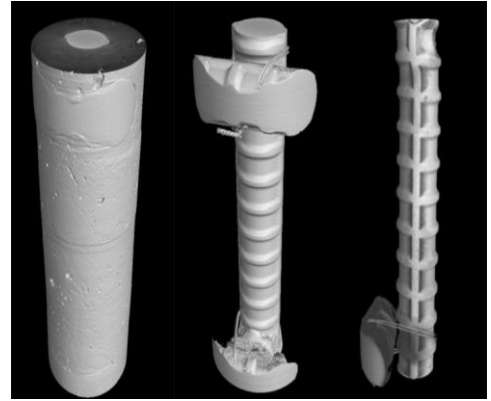


図-4 3次元化モデル

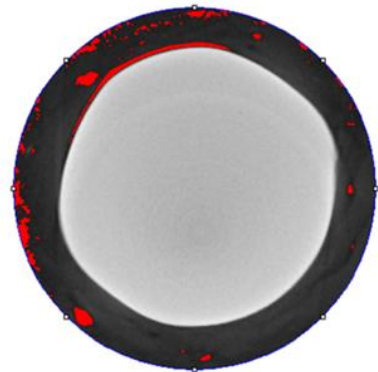


図-5 空隙部分だけを染色したCT画

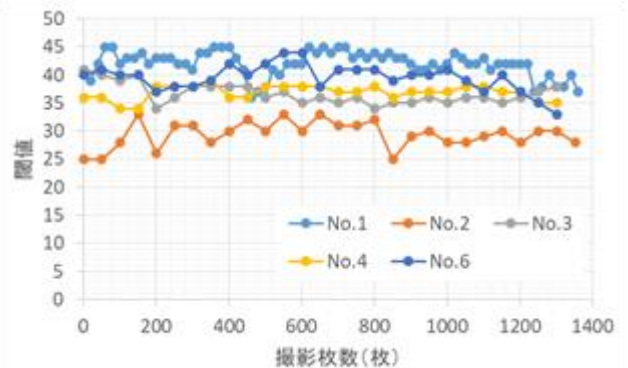


図-6 本試験で用いたしきい値

3. 試験概要

3.1 試験体概要

試験体は図-7に示すように、1,350mm×1,350mmとしブレイカ工法を用いることから衝撃でコンクリート試験体が割れないように板厚を300mmとした。また、鉄筋は主筋および配筋とともにD19を125mmピッチで配筋している。試験体中央に局部的に劣化したコンクリートを模擬するため450mm×450mmの範囲に低強度コンクリートを打設している。鉄筋のかぶりは純

被りで 30mm とした。試験体に使用したコンクリートの配合を表-1 に示す。はつり時のコンクリート圧縮強度は低強度コンクリートで 20N/mm^2 、高強度コンクリートで 49N/mm^2 であった。

3.2 はつり概要

一般的な 20 kg 級コンクリートブレーカを用いてはつりを実施した。コンクリートブレーカの仕様は、ピストン径が 40mm、ストローク 166mm、全長 556mm、打撃数は 1050b.p.m である。

はつり範囲は、試験体中央で縦 200mm×横 1350mm×深さ 70mm とした。はつり状況を写真-2 に示す。

3.3 コア採取方法

ブレーカ工法によりはつり処理をした試験体から、主鉄筋をコア削孔機より採取した。コア採取位置を写真-3 に示す。コア試験体は、鉄筋を中心に $\phi 50\text{mm}$ とし、採取したコア試験体を写真-4 に示す。なお、はつり面がコア採取中に剥離することが想定されたので、はつり面に赤色でペイントし、損傷状況を目視観察した。試験体には、はつり面が剥離していない試験体を用いて X 線 CT 観察を行った。本試験では、5 本のコアを採取した。その内訳は低強度コンクリートが 1 本、高強度コンクリートが 4 本である。

3.4 X 線 CT 撮影条件と分析領域

採取したコア試験体をスライス厚さ $30\mu\text{m}$ 、マトリクスサイズ $2000 \times 2000\text{pixel}$ で撮影を行い、一画素サイズは $30\mu\text{m}$ に設定した。なお、CT 画像のカッピング効果の影響を小さくする

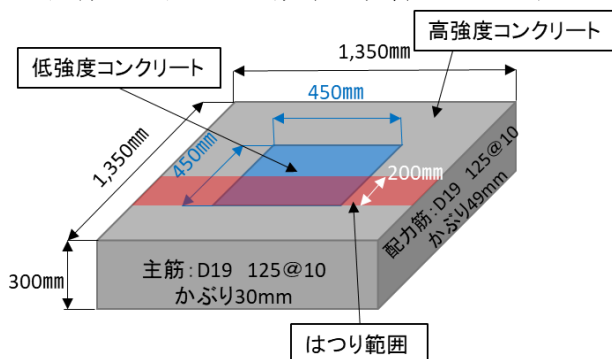


図-7 試験体の模式図

表-1 コンクリートの配合

	W/C	s/a	W	C	S	G	Ad
	(%)	(%)	(kg/m ³)				
低強度	69.0	47.5	157	228	907	1014	1.37
高強度	39.0	40.5	159	408	710	1055	2.45

C:普通ポルトランドセメント、S:富士川産川砂、G:富士川産川砂利(Gmax=25mm)、Ad:減水剤



写真-2 試験体のはつり状況

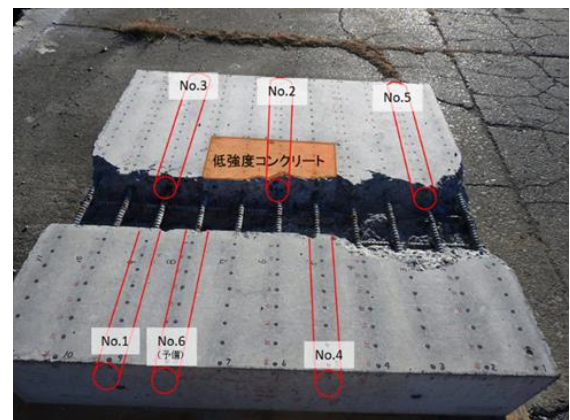


写真-3 コア採取位置



写真-4 採取したコア試験体

ために、本研究では図-5のように鉄筋とコンクリートの境界面付近以外は切り取り解析する箇所を抽出することでカップング効果の影響をより少なくした。ここで、カップング効果とは、試験体の円周部の CT 値が中央部分と比べて高くなってしまう現象である。カップング効果が現れた CT 画像を用いると、同一の材料であっても場所によって CT 値が異なるといった問題が生じてしまう。本研究では、鉄筋とコンクリートの境界面において打撃面側と反対側でどのような損傷が生じているのかを評価するため分析箇所を限定して解析を行っている。また、深度方向の分析領域としては、はつり面から深さ 100mm 程度までとした。深さ 100mm にした理由としては X 線 CT 法で全断面を測定し深さ 200 mm 以深では顕著な損傷と思われる空隙が確認されなかったからである。

4. 分析結果および考察

試験体 No. 1 の画像を図-8 に示す。左側に示しているのが、X 線 CT 法で撮影された試験体を再構成した画像であり、右側に示した画像は、鉄筋（黄緑色）と空隙（赤色）を抽出したものを示している。

画像解析の結果、多くの空隙は鉄筋のリブに沿って存在していることが確認された。この空隙は、ブレーカ等の外力を加えていない試験体でも確認されていることから、打設時のブリーディングの影響であると考えられる。また、打設面の鉄筋上面に発生した空隙は、ブレーカ等の外力により、鉄筋とコンクリートの間に隙間が生じたものすなわち付着切れを捉えていると考えられる。

次に、試験体 No. 3 の再構成画像より切り出した断面図を図-9 に示す。この図は左側が打撃面であり、主筋と配力筋の交差部に着目して切り出した結果である。配力筋直上の主筋には、コンクリートと鉄筋の隙間が発生していることがわかる。すなわちこの部分ではブレーカの打撃により鉄筋とコンクリートの付着切れが生じ

ていることと言える。

上述した結果は一例であり、X 線 CT 法の画像診断は 3 次元で行えることから、いろいろな視点からの評価が可能となる。例えば、鉄筋腐食の進行とそれに伴うひび割れの進展やアルカリ骨材反応などのひび割れ進展などを同一試験体で何度も測定することが可能となる。この様な特性から、X 線 CT 法はコンクリート内部の評価に適している手法であることが言える。また、X 線 CT 法の場合、各種の画像解析手法を用いることで、空隙の大きさや多さによる評価、X 線吸収係数などの密度による評価などいろいろな指標での数値評価が可能となる。したがって、画像による「視覚的な評価」に加えて「定量的な評価」も可能なことから、より客観的な評価が可能となり、材料の状態や状況进行评估するには有意である手法と考えられる。

次に、本研究では、X 線 CT 法を用いて、画像

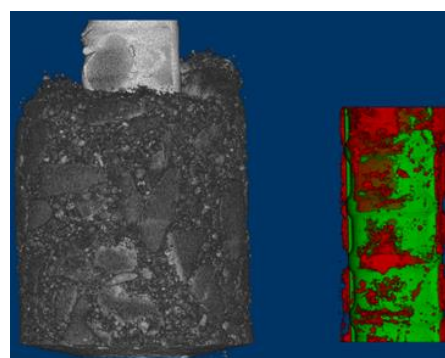


図-8 X 線 CT 法で撮影した試験体 No. 1
左：再構築画像，右：鉄筋・空隙の抽出画像

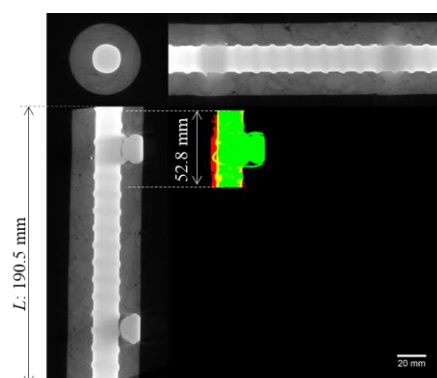


図-9 試験体 No. 3 の再構成画像より
切り出した断面図

評価と画像解析より得られた CT 値からブレーカ等の外力により発生した鉄筋とコンクリートの付着切れについて評価を試みた。

本試験でブレーカ処理をした試験体を用いて X 線 CT 法で撮影し、3 次元画像解析を行った結果の一例を図-10 に示す。上述したように、コンクリート内部にある気泡等は除去し、鉄筋とコンクリートの界面に着目できるように加工を施している。3 次元画像解析の結果、鉄筋とコンクリートの間に隙間が発生していることが確認できた。しかしながら、ブレーカ工法ではつり処理をしても鉄筋とコンクリートの間に隙間が発生していない試験体（試験体 No. 4）も確認された。したがって、全ての鉄筋でコンクリートと鉄筋の付着切れが生じるのではなく、ブ

レカ等で鉄筋を打撃してしまったなどの要因で付着切れが生じる可能性がある」と推測された。

5. まとめ

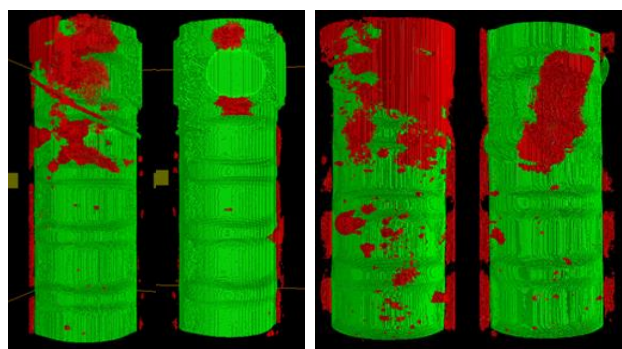
X 線 CT 法を用いてはつりで生じたコンクリート内部損傷、特に鉄筋とコンクリートの付着切れに着目し 3 次元画像解析で評価を行った結果、以下のことが判明した。

- (1) ブレーカ工法によりはつり処理をした結果、鉄筋とコンクリートとの間に隙間が発生しているのを確認した。この隙間は、ブレーカの打撃によって付着切れが発生したものと考えられる。
- (2) ブレーカ等で鉄筋を打撃することで、より深く位置で付着切れが発生することが確認された。
- (3) 鉄筋のリブ近傍にはブリーディンと考えられる低密度の箇所が確認された。

以上のことから、X 線 CT 法を用いることで、従来評価ができなかった鉄筋とコンクリートの付着切れについて詳細な調査ができることが判明した。また、コンクリート内部の微細なひび割れなど空隙を有する領域や、密度が低い領域などの評価も可能であることを示した。

参考文献

- 1) 谷倉泉；コンクリート構造物に生じた変状部のはつり処理に関する研究，熊本大学博士論文，P. 257, 2019. 3.
- 2) Yuzo Obara et al.: Evaluation of Micro-damage of Concrete Specimens under Cyclic Uniaxial Loading by X-ray CT Method, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 14, pp. 433 ~ 443, 2016. 8.

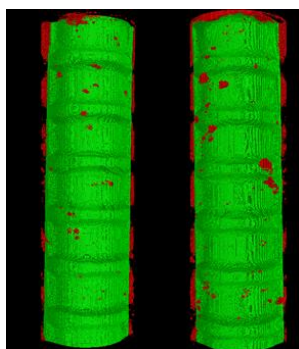


打撃面 裏面
a) 試験体 No. 2

打撃面 裏面
b) 試験体 No. 3

(低強度コンクリート)

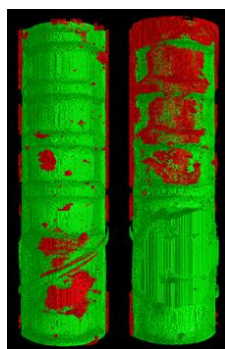
(高強度コンクリート)



打撃面 裏面

c) 試験体 No. 4

(高強度コンクリート)



打撃面 裏面

d) 試験体 No. 5

(高強度コンクリート)

図-10 X線CT法3次元画像解析

(赤色：空隙，黄緑色：鉄筋)