

X 線 CT を用いたブレーカおよびウォータージェットによるはつり工法の損傷評価

(一社) 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 (1) 谷倉 泉
(一社) 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 (1) 渡邊 晋也
(一社) 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 (1) 内田 美生
熊本大学 大学院自然科学研究科 (2) 尾原 祐三

Damage Estimation of Concrete by Two types of Chipping Using X-ray CT Method

Key Words : Damage, Chipping, Breaker, Water-jet, X-ray CT method, Bending test

1. はじめに

近年、経年劣化したコンクリートの補修対策として、既存構造物に補修材料を打ち足す増厚や断面修復などの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るが、一般的に重さ 10~30kg 前後のブレーカ（以下 BR とする）や、ウォータージェット（以下 WJ とする）が用いられている。BR によるはつりは、手軽にはつり処理ができる半面、鉄筋を傷つけたりするほか、コンクリートに微細ひび割れや浮石等の脆弱部を発生させることが蛍光エポキシを含浸させた画像解析法¹⁾などにより明らかにされている。一方、WJ によるはつりにおいては、表面から数 mm はつれば、新しく打設したコンクリートと十分な付着強度を得られることが明らかにされている²⁾。しかし、それぞれのはつり工法で発生する振動や圧力（水压等）がコンクリートに与える損傷の定量的評価はなされておらず、また、損傷の程度や深さなどは十分に明らかにされていない。そこで本研究では、劣化したコンクリートを補修する際の BR および WJ 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 法を適用してはつりコンクリートの損傷評価を行った。評価に用いた X 線 CT 法³⁾は、非破壊でコンクリート内部の空隙やひび割れなどの三次元表示が可能であり¹⁾、各種パラメータを用いることによって、コンクリートの損傷を定量的に評価することが可能である。本研究では、筆者らが行ったコンクリート円柱供試体の一軸圧縮試験に X 線 CT 法を適用し、载荷に伴って発生する劣化を評価する際に用いた、3 つのパラメータ、すなわち、空隙率を表す Porosity index、き裂幅を表す Burn number、空隙の繋がりを示す Medial axis³⁾を用いて BR によるはつりがコンクリートに与える影響を評価した。その結果、はつり面から約 4cm の深度まで損傷を与えることが明らかとなり、パラメータの有用性が確かめられている。また同様の手法を用いて、WJ によるはつり処理されたコンクリートの損傷評価を行い、はつり工法が与える影響を定量的に評価した上で、BR と WJ のはつりによる損傷の比較検討を行った。

2. X 線 CT スキャナシステム

2.1 X 線 CT 装置

本研究で使用した装置は μ フォーカス X 線 CT スキャナであり、この装置の最大出力は 240 kV、分解能は 4 μ である。装置の外観を Photo.1 に、装置内部のイメージを Fig.1 に示す。

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。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

(1) Izumi TANIKURA, Shinya WATANABE and Yoshio UCHIDA (Japan Construction Method and Machinery Research Institute, Japan Construction Mechanization Association, Fuji 417-0801, Japan)

(2) Yuzo OBARA (Dept. of Civil & Environmental Engineering, Kumamoto University, Kumamoto 860-5888, Japan)



Photo.1 μフォーカスX線CT装置

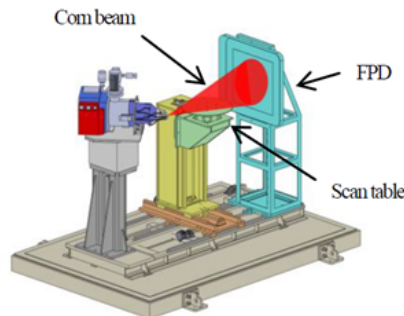


Fig.1 μフォーカスX線CT装置の概要

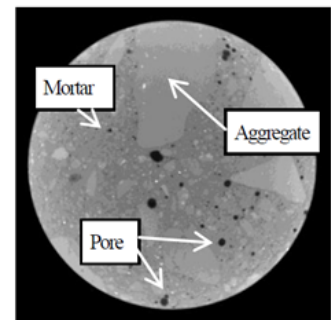


Fig.2 コンクリートのCT画像

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）場合は黒色に表示される。これにより、Fig.2 のように、骨材、モルタル、空隙が視覚的に判別できる。

3. 画像解析法

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。本論文では、コンクリートの損傷を表すパラメータとして Porosity index, Burn number および Medial axis を用いた。これらのパラメータは Fig.3 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ヒストグラム関数 3 回微分法によって決定する。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⁾。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 Porosity index を求める。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 Burn number および Medial axis を得る。Burn number とは空隙の大きさやき裂の幅を示す値である。Fig.4 は、CT 画像の拡大模式図を示す。Fig.4 において、空隙やき裂を挟む材料と隣り合っている空隙側ボクセルに 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り、空隙の大きさあるいはき裂の幅を示すこととなる。これまでの研究において、損傷を評価する際には最も小さなき裂を示す Burn number1 が有効であることが確かめられており、本研究においてもこの値を用いることとした。また、Fig.4 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が連続していることを示している。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 によって求められる。

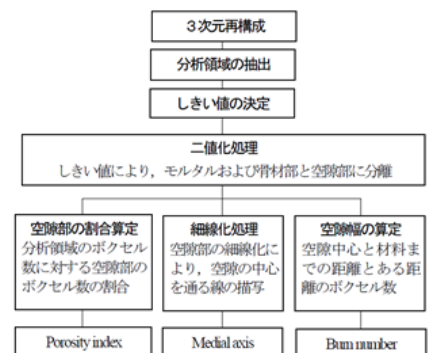


Fig.3 パラメータを得るためのフロー

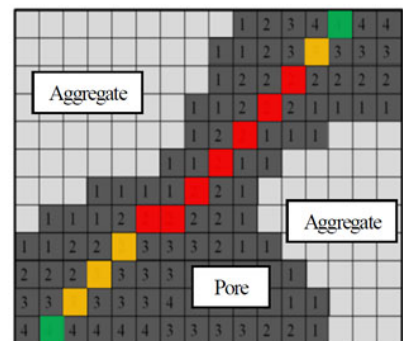


Fig.4 パラメータを得るためのフロー

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 BR および WJ を使用し、はつり処理を行った。はつり用コンクリート試験体は、40-8-25N で、W/C:37.8%, S/a:39.9%である。BR ではつりを施した試験体の寸法は 40cm×40cm×11cm, WJ ではつりを施した試験体の寸法は 100cm×100cm×20cm である。どちらの試験体とも 5 日間湿潤養生した

後に気中養生を行い、打設後 28 日で BR（ここでは、ピックハンマーの 7.3kg を使用）、30cm×30cm を深さ約 2cm ではつり処理を施した。また WJ でののはつりは、水圧 180MPa、水量 20L/min に設定し、はつり深度は 10cm とした。はつり処理を行った試験体から $\phi 50\text{mm}$ のコア供試体を、BR で 6 本、WJ で 3 本採取した、それぞれ供試体 BR1~BR6 および供試体 WJ1~WJ3 とした。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劣化は、はつりによって除去できることが明らかとなったため、本研究ではコンクリートブロックのブリーディング等は考慮せずに議論を進める。

4.2 X 線 CT 撮影と分析領域

採取したコア供試体をスライス厚さ $50\mu\text{m}$ 、はつり面から 1800 断面（約 90mm）の X 線 CT 撮影を行った。分析は Fig.5(a)のように、はつり面から供試体の底面に向かって 7 つの深さ Depth1~Depth7 に分けて行った。また、Fig.5 (b)に示すように、各深さにおいて 5 つの area に分割して分析を行った。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 $50\mu\text{m}$ のボクセル約 1065 万個で構成されている。

4.3 分析結果と考察

BR によってのはつりが施された 6 本の供試体の Porosity index を Fig.6 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 を用いている。Fig.6 より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。つぎに、Burn number 1 の深さ方向分布を Fig.7 に示す。深度ごとの 5 つの area の Burn number 1 の値を足し合わせたものをプロットし、あわせて平均値も示した。ほとんどのコアの Burn number1 がはつり面の直下の領域 Depth1 において大きな値となり、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 あるいは 5 を超えるとほぼ一定の値となっている。Burn number1 は、0.1mm 以下の微小き裂と考えられるので、BR によるの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、とくに直下で著しく、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。一方、WJ によってのはつりが施された 3 本の供試体の

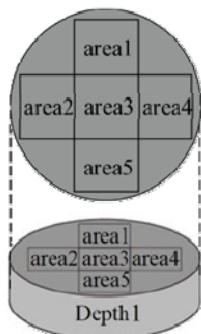
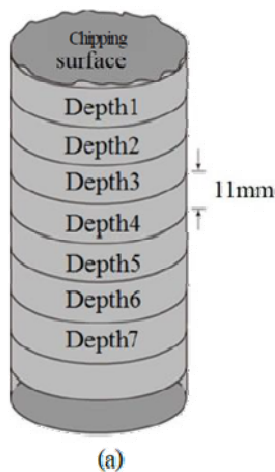


Fig.5 試験体の分析領域

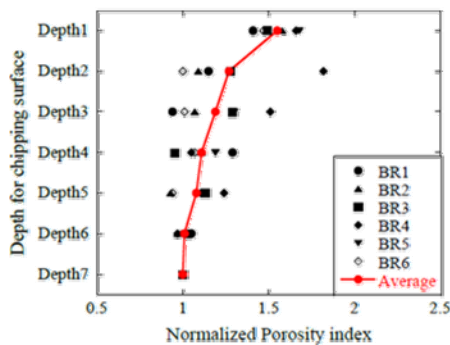


Fig.6 正規化した Porosity index の深さ方向分布

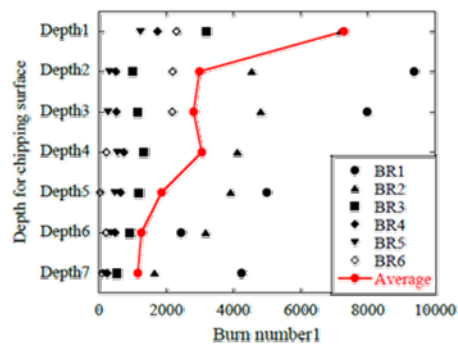


Fig.7 合計した Burn number1 の深さ方向分布

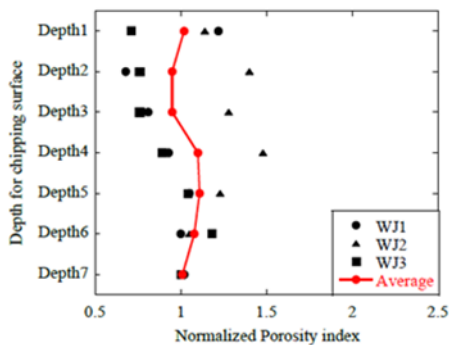


Fig.8 正規化した Porosity index の深さ方向分布

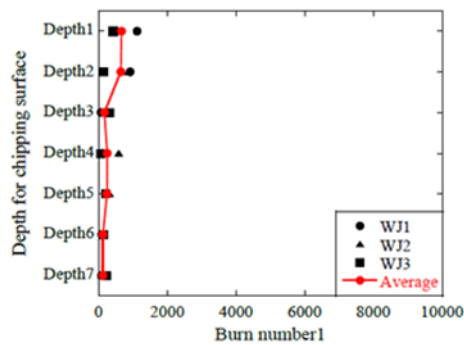


Fig.9 合計した Burn number1 の深さ方向分布

Porosity index を Fig.8 に示す。こちらでも深度ごとの 5 つの area の平均値を Depth7 の値で正規化した Porosity index を示す。この値は深さ方向にほぼ一様に分布しており、各供試体においてもはつり面近傍の値が BR による結果のように大きくなるような傾向は見られない。この結果はコンクリート打設時の空隙が結果として表れたものであると考えられる。つぎに、Burn number1 の深さ方向分布を Fig.9 に示す。こちらでも深度ごとの 5 つの area の足し合わせた Burn number1 の値をプロットしている。値は小さく、深さ方向においてもほぼ同様であるが、Depth1 および 2 でわずかに大きくなり、その値は約 800 である。BR1 , BR2 以外の結果では、Depth3 以深においては同様な傾向を示しているが、はつり面近傍では約 2000 の値を示している。したがって、WJ を用いるとコンクリートに与える損傷は少ないと推察される。

最後に、Medial axis の例として BR1 の Depth1~4 の結果を Fig.10 に、WJ1 の Depth1~4 の結果を Fig.11 に示す。BR によるはつりの供試体において Depth1 では、暖色の線が繋がって、ある領域に集中しているが、これは、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発生しているということが確かめられている。一方、はつり面から離れるにしたがって線のつながりが見られなくなる。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。この結果から、はつりによる微小き裂は空隙の周りにも発生しやすいことがわかる。一方、WJ によるはつり供試体の結果を見ると Depth1 において暖色の線のつながりが、わずかながらあるものの BR の結果と比較すると少ないことがわかる。また、Depth2 以深においては暖色の線のつながりはほとんど見られず、寒色の線、すなわちコンクリート打設時に発生した空隙のみが表されている。これらの結果から、BR によるはつりは、はつり面より深い領域にも損傷を与えており、その深さは約 4cm であることが明らかとなった。また、WJ ではつりを行った方が BR と比較してコンクリートに与える損傷は少ないことが明らかとなった。

5. 結論

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およびウォータージェット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 法および曲げ強度試験法を適用してはつりコンクリートの損傷評価を行った。この結果、コンクリート内部の空隙やひび割れは、Porosity index, Burn number, Medial axis という 3 つのパラメータで視覚的に表現できることを明らかにした。さらに、これらのパラメータを用いてコンクリート内部の状態を再現すると、ブレーカによるはつりは、コンクリートのはつり面の直下を著しく劣化させ、一体性の低下につながったことが推論された。一方、WJ 工法は、はつりコンクリートに与える損傷は小さく、新旧コンクリート境界面の付着も充分であることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 渡邊晋也, 後藤昭彦, 松本政徳, 宮永憲一: 打撃工法によるハツリ処理で生じた微細ひび割れの定量的評価方法と打継ぎ界面の付着強度に関する研究, コンクリート工学会年次論文集, vol.35, No.1, 2013
- 2) 迫田恵三: ウォータージェットで表面処理したコンクリートの打継目の付着性状, 噴流工学 Vol.22, No.1, pp.16-20, 2005
- 3) Obara, Y., Tanikura, I., Jung, J., Shintani, R., Watanabe, S.: 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

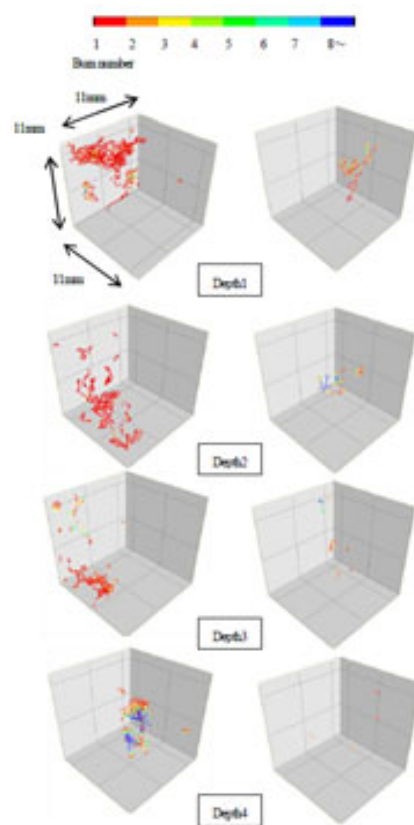


Fig.10 Medial axis の結果 (BR1) Fig.11 Medial axis の結果 (WJ1)