

画像解析技術のトンネル覆工ひび割れ調査への適用

ウェーブレット変換を用いた画像解析 t. WAVE でひび割れ調査の高度化

小山 哲^{*1}・丸屋 剛^{*1}・堀口 賢一^{*1}・澤 健男^{*2}

Keywords : crack investigation, tunnel, lining concrete, wavelet transform, image analysis

ひび割れ調査, トンネル, 覆工コンクリート, ウェーブレット変換, 画像解析

1. はじめに

コンクリート構造物の維持管理をする上で、コンクリート表面に発生するひび割れ、剥離剥落、遊離石灰などの変状の点検が行われている。その中でも、ひび割れは構造物の劣化状態を評価する上で最も基本的な情報であり、現状行われている日常点検などの点検業務においてもひび割れの発生状況を観察することが基本とされている。

このようにコンクリート構造物の点検の基本となっているひび割れ調査において、現状では目視観察が多く行われており、観察員がひび割れ発生状況を確認し、クラックスケールを用いて特定箇所ひび割れを測定し、図面に記録する方法が一般的である。この方法には、観察員によるひび割れ評価にばらつきや見落としが生じること、目視できるひび割れの抽出精度には限界があること、調査する場所が高所や上向きでの長時間作業も多く作業環境が良くないこと、広域な調査範囲に対して点検調査作業の時間や費用が掛かることなどの問題点が挙げられる。

これに対して、点検調査作業に要する時間や費用の効率化、ひび割れ評価の定量化や高精度化を図るために、コンクリート表面をデジタルカメラやビデオカメラを用いて撮影し、画像処理技術を用いてひび割れを検出し、評価する技術が期待されている。

近年、高解像度のデジタルカメラやビデオカメラの開発や普及に伴い、デジタル撮影技術は高性能化しているものの、画像の最小単位である画素（ピクセル）の輝度を閾値としてひび割れを判定する従来の画像処理手法はひび割れ検出の精度に限界がある。

このような背景のもと、著者らは、画像処理によるひび割れ検出の精度向上や効率化を図るために、画像データにウェーブレット変換を適用してひび割れを検出する技術を開発した。

本報では、本手法を国道 246 号線山北バイパスのトンネル覆工コンクリートのひび割れ調査に適用し、ひび割れ評価の精度検証について報告する。

2. ひび割れ画像解析技術

本手法は、周波数解析の一手法であるウェーブレット変換を用いて、コンクリート表面に発生しているひび割れの検出を行うものである。ウェーブレット変換は、撮影画像の局所的な輝度情報を周波数と方向成分に分解して、ひび割れを検出する方法である。図-1 に画像解析の処理フローを示す。図中の破線の枠で囲まれた部分は、ひび割れ画像解析の処理部分である。

本手法は、以下に示す処理から構成されている。

2.1 現地撮影および撮影画像処理

デジタルカメラやビデオカメラを用いて、コンクリート表面の撮影を行う。現地で被写体を斜めから撮影した時にはあおり補正を施して正対した画像に変換し、トンネルのような曲率を持った対象面に対しては曲率補正を施して幾何補正を行う。

この補正処理を必要に応じて行い、ひび割れ画像解析を行うための入力画像を作成する。

2.2 ひび割れ画像解析

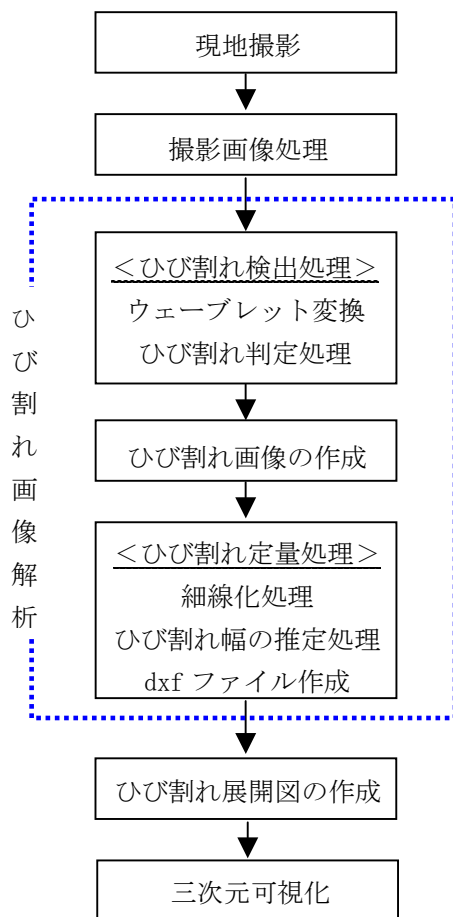
入力画像に基づくひび割れ画像解析の手順を以降に示す。

2.2.1 ひび割れ検出処理

撮影画像処理後の画像データにウェーブレット変換を行い、ひび割れの特徴量であるウェーブレット係数を求める。この係数を用いてひび割れ判定を行い、ひ

*1 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室

*2 国土交通省関東地方整備局



図ー1 画像解析の処理フロー
Fig.1 Processing flow of image analysis

び割れ部分を検出した画像（二値化画像と呼ぶ）を作成する。

(a) ウェーブレット変換

ウェーブレットとは、「小さい波」という意味であり、局在性を持つ波の基本単位として、式(2)に示すウェーブレット関数を用いて表現される。

ウェーブレット変換は、ウェーブレット関数を撮影画像上で平行移動と回転させて、重ね足し合わせる畳み込み積分を行う。二次元ウェーブレット変換の基本式(1)より、ウェーブレット係数を求める。

$$\Psi_{\theta,k}(x_0, y_0) = \frac{1}{a^k} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \psi\left(\frac{x-x_0}{a^k}, \frac{y-y_0}{a^k}\right) dx dy \quad (1)$$

ここで、 $f(x, y)$ は入力画像、 $\psi(x, y)$ はウェーブレット関数、 (x, y) は二次元空間座標、 (x_0, y_0) は (x, y) 平面上の平行移動量、 a^k は $\psi(x, y)$ の拡大縮小を表し、整数 k は dilation step と呼ばれるパラメータである。

ウェーブレット関数は式(2)、ガウス関数は式(3)、座標回転は式(4)である。

$$\psi(x, y) = g(x', y') [\exp(i2\pi f_0 x') - \exp\{-(2\pi f_0 \sigma)^2\}] \quad (2)$$

$$g(x', y') = \frac{1}{2\pi\sigma} \exp\left\{-\frac{x'^2 + y'^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで、 f_0 は中心周波数、 σ はガウス関数の大きさ、 θ は波の進行方向を表す回転角、 (x', y') は座標 (x, y) を角度 θ 回転させた座標系を表す。

次に、ウェーブレット係数の累計値は座標点 (x_0, y_0) における空間周波数と回転方向のウェーブレット関数と撮影画像との相関を表す複素数の絶対値として式(5)で表せる。

$$C(x_0, y_0) = \sum_{\theta} \sum_k |\Psi_{\theta,k}(x_0, y_0)| \quad (5)$$

式(5)より求めた $C(x_0, y_0)$ を用いて、ひび割れ判定処理を行う。

(b) ひび割れ判定処理

ウェーブレット係数によるひび割れの判定は、判定対象とする画素の輝度とその周辺画素の輝度との相対的な関係で決定される。この 2 つの輝度の組合せからひび割れを判断する閾値テーブルは予め求めてあり、ひび割れを判定する画素のウェーブレット係数とその画素での閾値との大小関係からひび割れ判定を行う。

2.2.2 ひび割れ画像の作成

ひび割れ検出処理で得られた二値化画像では、ひび割れ部分を白、それ以外の部分を黒の 2 値で表現する。しかし、コンクリート打継ぎ目や汚れなどのひび割れ以外の部分もひび割れと認識してしまうために、画像編集ソフトを用いてマニュアル操作でひび割れ部分のみの画像（ひび割れ画像と呼ぶ）を作成する。

2.2.3 ひび割れ定量処理

ひび割れ画像に対して細線化処理を行い、ひび割れ幅の推定処理やひび割れ幅のヒストグラム作成、CAD ソフトに受け渡すための dxf ファイル作成およびひび割れ分布図やひび割れ経年変化の追跡図などの処理を行う。

(a) 細線化処理

ひび割れ画像に対して、ひび割れの中心線を一画素

幅で描いた画像を作成する。

(b) ひび割れ幅の推定処理

細線化処理で得られた各画素のウェーブレット係数値や輝度情報からひび割れ幅の推定を行い、ひび割れ幅ごとの長さや比率のヒストグラムを作成する。

(c) dxf ファイル作成

ひび割れ幅の推定処理で求めたひび割れ幅と位置情報を dxf ファイル形式で作成し、CAD ソフト上で図化できるようにする。

2.3 ひび割れ展開図の作成

ひび割れ定量処理でセクション単位に作成した dxf ファイルから CAD ソフト上で合成処理を行い、ひび割れ展開図を作成する。

2.4 三次元可視化

可視化ソフトを用いて、撮影画像やひび割れ展開図を取り込み、三次元表示することができる。また、このソフト上で遊離石灰や漏水などの変状をトレースし、ひび割れ展開図に加えて三次元表示することも可能である。

3. トンネル覆工ひび割れ調査への適用

3.1 調査概要

2003 年に竣工した延長 325m の 2 車線道路トンネルの覆工コンクリートを対象として、デジタルビデオカメラで撮影した画像を本手法により解析し、ひび割れ展開図を作成した。また、このひび割れ展開図を撮影画像からトレースして作成する方法および目視観察から作成する方法でも行って、ひび割れ発生状況とひび割れ幅や長さについて本手法との比較を行った。

3.2 現地撮影



写真－1 現地撮影状況
Photo.1 Crack investigation of tunnel lining

写真－1 に現地撮影状況を示す。13 台のデジタルビデオカメラ、録画装置、照明器および発電機などを 4t トラックに搭載し、時速 10～20km で走行しながら覆工コンクリート面の撮影を行った。上り線と下り線を一往復することにより、覆工面全体を撮影することができた。0.3mm 以上のひび割れを検出するために、空間分解能 1.5mm/pixel で撮影を行った。

3.3 撮影画像処理

現地で撮影した映像を静止画像に変換し、約 10m ごとに 32 個のセクションからなる静止画像データを作成した。静止画像に対してカメラと覆工コンクリート面との撮影角度により生じる歪みの幾何補正処理を行い、さらにトンネル延長方向および円周方向に画像データを繋ぎ合わせた。図－2 にセクション No.30～32 の撮影画像の展開図を示す。

展開図の上部分はトンネルの左側壁、中央部分は天端、下部分は右側壁に相当する。

3.4 ひび割れ画像解析（展開図の作成）

ひび割れ展開図の作成は、(a)本手法、(b)撮影画像からトレース、(c)目視観察の 3 通りの方法で行った。

本手法は、他の 2 つの方法に比べて、人為的な判断を極力少なくしているため、ひび割れを精度良く、定量的かつ客観的に評価することができる。

3 つの方法を以下に示す。

(a) 本手法

撮影画像からウェーブレット変換を用いた画像解析を行い、検出されたひび割れを AutoCAD で展開図の作成を行う。この方法の特徴として、人為的な判断を介さずに効率的な処理ができ、ばらつきの極めて少ない定量的かつ高精度なひび割れ評価ができる。ただし、型枠跡やコンクリート上の顕著な汚れなどをひび割れと認識するため、これらを除くための後処理が必要となる。

(b) 撮影画像からトレース

撮影画像から作図ソフトを用いて、ひび割れをトレースして展開図を作成する。この方法の特徴として、ひび割れを高精度に抽出することができるが、トレースする際の人為的な判断が介入するために、方法(a)に比べてばらつきの生じる可能性が高くなる。

(c) 目視観察

この方法は画像解析や作図ソフトなどを必要とせず簡易的に点検調査できる。しかし、スケッチやトレースする際に人為的な判断を必要とする処理が多く、ひび割れの見落としや誤認などが生じるため、ひび割れ評価を客観的に定量化することが難しい。

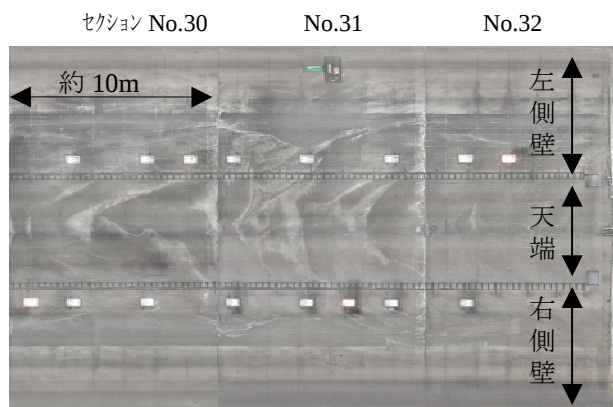


図-2 撮影画像の展開図
Fig.2 Interior elevation of photographic image

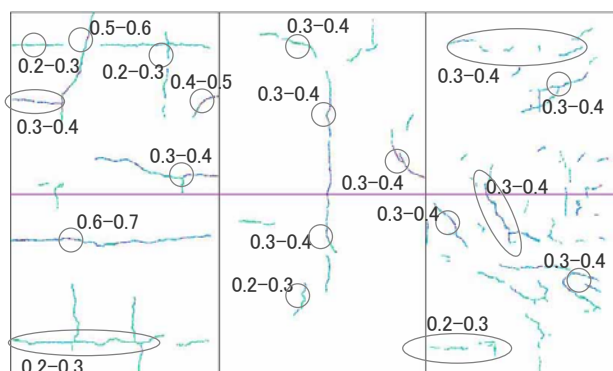


図-3(a) 方法(a)によるひび割れ展開図
Fig.3(a) Crack interior elevation by method(a)

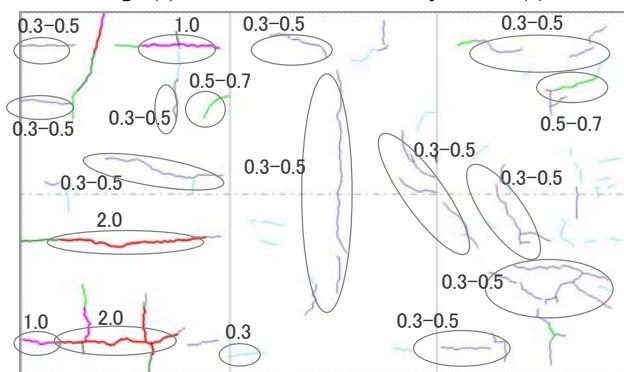


図-3(b) 方法(b)によるひび割れ展開図
Fig.3(b) Crack interior elevation by method(b)

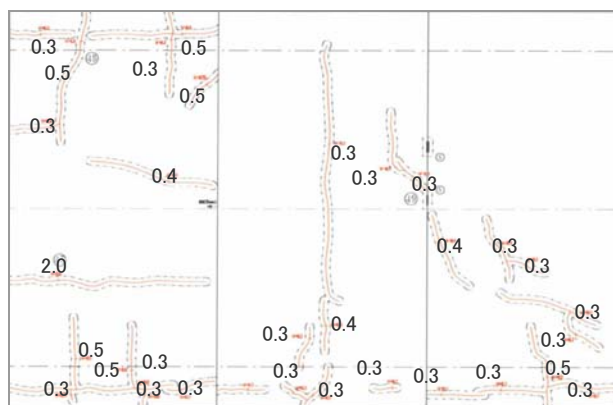


図-3(c) 方法(c)によるひび割れ展開図
Fig.3(c) Crack interior elevation by method(c)

3.5 ひび割れ展開図の比較

3.5.1 ひび割れ発生状況

セクション No.30～32 のひび割れ発生状況の結果を比較する。図-3(a)は本手法によるひび割れ展開図、図-3(b)は撮影画像からトレースしたひび割れ展開図、図-3(c)は目視観察から作成したひび割れ展開図である。

撮影画像から作成した展開図(a)と(b)は、ほぼ同じようなひび割れの分布状況を示している。一方、目視観察から作成した展開図(c)は、ひび割れを見落としている箇所が多くあり、他の2つの方法(a)と(b)に比べて、ひび割れを検出する精度が劣っていることが認められる。

図-3(a)と(b)における 0.3mm 以上のひび割れ幅の

表-1 ひび割れ延長の比較
Table.1 Comparison of crack extension

	No.30	No.31	No.32
方法(a)	59.5m	23.1m	55.6m
方法(b)	55.6m	23.8m	43.5m

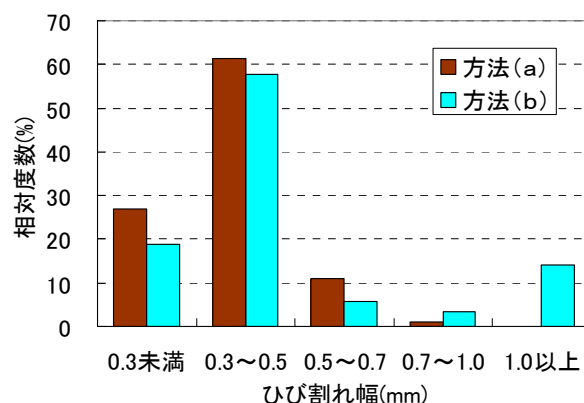


図-4 ひび割れ幅のヒストグラム
Fig.4 Histram of width of crack

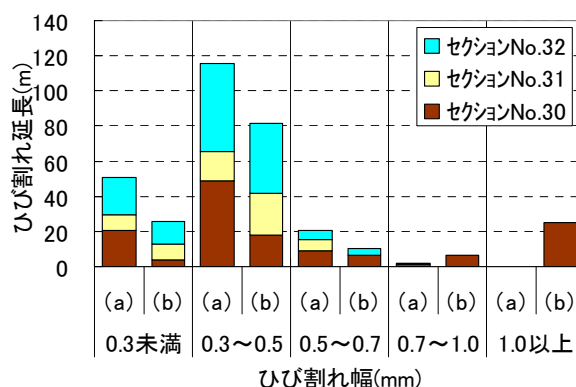
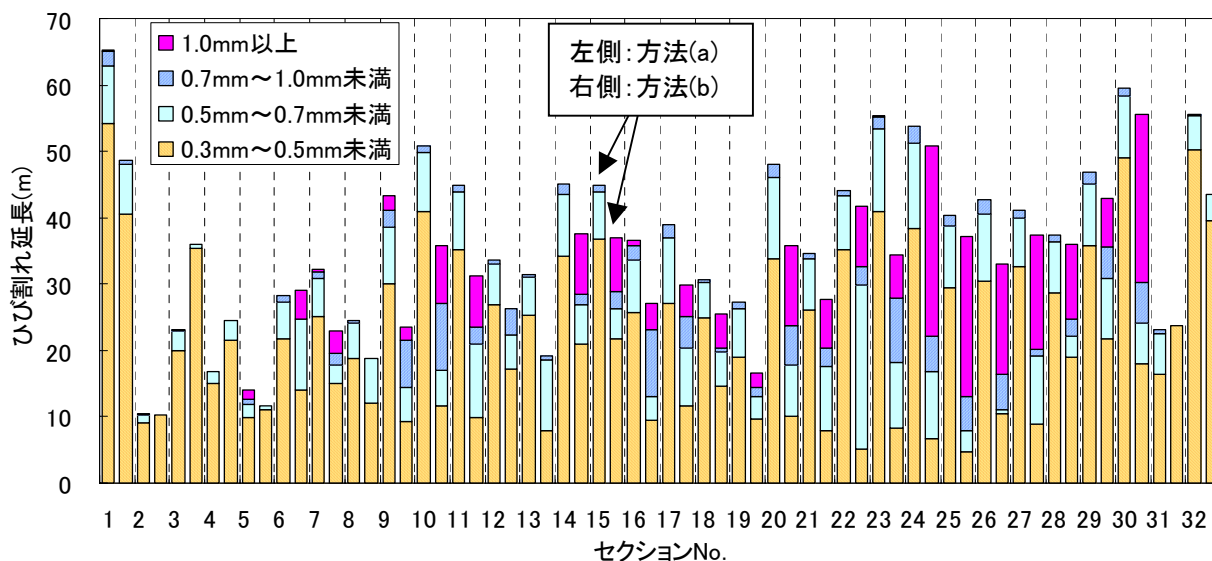


図-5 ひび割れ幅ごとのひび割れ延長
Fig.5 Crack extension of each width of crack



図ー6 セクションごとのひび割れ延長
Fig.6 Crack extension of each section

延長は、表ー1に示すようにセクション No.30 と No.31 では定量的に良く一致している。セクション No.32 で方法(a)に比べて方法(b)の値が小さいのは、比較的細かいひび割れをトレースしていないためである。

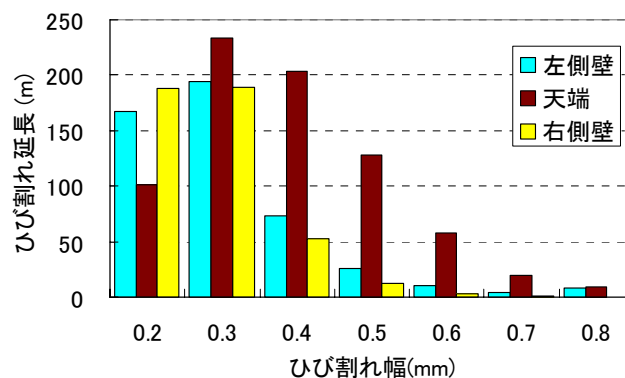
3.5.2 ひび割れ幅と長さ

セクション No.30～32 で目視により実測したひび割れ幅を図ー3 (c)中の数字(単位: mm)で示す。この測定結果によれば、セクション No.30 の天端付近のごく一部に 2.0mm の広いひび割れが見られるが、全体的に 0.3～0.5mm のひび割れが多く発生していることが分かる。

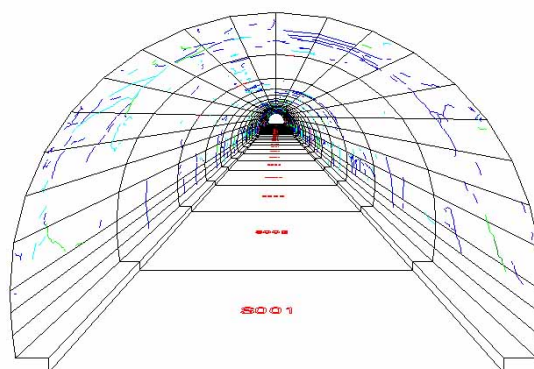
図ー3 (a), (b)中で、ひび割れ幅は色分けで表示している。図ー3 (a)では 0.2-0.3mm は水色、0.3-0.4mm は青、0.4-0.5mm は橙色、0.5-0.6mm は茶、また図ー3 (b)では 0.3-0.5mm は青、0.5-0.7mm は黄緑、0.7-1.0mm は緑、1.0mm 以上は赤である。

図ー3 (a)のセクション No.30～32 のひび割れ幅は測定値とよく一致している。図ー3 (b)も比較的良く一致しているが、セクション No.30 では 1.0mm 以上のひび割れが多く、広いひび割れの見られる箇所では広い範囲でひび割れ幅を大きめに判断する傾向が見られる。方法(a)では、広いひび割れの見られる箇所の近傍でも図ー3 (c)の実測したひび割れ幅に近い値を示しており、方法(b)に比べて精度良くひび割れを評価している。

図ー4に方法(a)と(b)によるセクション No.30～32 のひび割れ幅のヒストグラムを、図ー5にセクションごとのひび割れ延長を示す。この2つの方法は比較的良



図ー7 位置別のひび割れ延長(本手法による解析)
Fig.7 Crack extension of each position by image analysis



図ー8 三次元ひび割れ分布図(CrackDraw21)
Fig.8 Three dimensional crack distribution chart

く合致しているが、方法(b)でひび割れ幅 1.0mm 以上は 14%を占めており、セクション No.30 でひび割れ幅を大きめに評価していることが定量的に分かる。

図ー6は方法(a)と(b)によるセクションごとのひび割

れ延長の分布図を示す。図中で各セクションの棒グラフの左側は方法(a), 右側は方法(b)による結果を示している。この 2 つの結果を比較すると, 方法(a)の方がひび割れ延長を長めに評価している。また, 方法(b)は方法(a)に比べてひび割れ幅を大きめに評価する傾向が見られる。この理由として, 撮影画像からトレースする際にひび割れの見落としや細かいひび割れを抽出していないこと, またひび割れ幅を評価する際のばらつきなどの人為的な判断による影響と考えられる。なお, 方法(c)による目視観察では, ひび割れ幅は代表的な点単位で測定しているため, このような面単位でひび割れ幅を評価することは難しい。

図-7 はトンネル全延長に対して, トンネルの左右側壁と天端の位置でのひび割れ長さを比較した結果である。ひび割れ 0.4mm 以上で, 天端付近のひび割れが他の位置に比べて多いことが分かる。

図-8 に CrackDraw21 を用いて, コンクリート覆工面にひび割れ展開図を貼り付けて, ひび割れ分布状況を三次元表示した透視図を示す。このように三次元で可視化することにより, ひび割れ発生位置や方向, 幅や長さを分かりやすく把握することができる。

4. おわりに

トンネル覆工コンクリートをデジタルビデオカメラで撮影し, ウェーブレット変換を用いた画像解析を適用してひび割れ展開図を作成した。この結果と目視観察から作成したひび割れ展開図および撮影画像からトレースしたひび割れ展開図との比較より, 以下のよう

- ・ 本手法によれば, 空間分解能 1.5mm/pixel の撮影画像から, 0.3mm 以上のひび割れを検出することが十分可能である。

- ・ 検出されたひび割れの分布は, 本手法と撮影画像からトレースした方法とでほぼ一致した。しかし, 0.1mm 以上の広いひび割れの見られる箇所では, 撮影画像をトレースする方法は, 広い範囲で実測したひび割れ幅より大きめに判断する傾向が見られた。一方, 本手法では実測したひび割れ幅とほぼ一致しており, 方法(b) に比べて精度良くひび割れを評価していることが分かった。
- ・ 目視観察から作成した展開図は, ひび割れの見落としや誤認が見られ, 他の 2 つの方法に比べてひび割れ検出精度が劣っていることが分かった。
- ・ 本手法は, 人為的な判断の影響を極力少なくしているため, ひび割れを精度良く, 定量的かつ客観的に評価できるため, 構造物の適切で効率的な管理に有効であると考ええる。

参考文献

- 1) 丸屋 剛, 堀口賢一, 小山 哲, 澤 健男: 床版コンクリートのひび割れ調査への画像解析技術の適用, プレストレスコンクリート, Vol.50, No.2, pp.85-91, 2008.
- 2) 中野宏毅, 山本鎮男, 吉田靖夫: ウェーブレットによる信号処理と画像処理, 共立出版, pp.1-89, 1999.
- 3) 丸屋 剛, 堀口賢一, 小山 哲, 澤 健男: ウェーブレット変換を用いた床版コンクリートのひび割れ調査の実用化, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.691-696, 2007.
- 4) 武田 均, 堀口賢一, 小山 哲, 丸屋 剛: ウェーブレット変換を用いたコンクリートのひび割れ画像解析手法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1895-1900, 2006.
- 5) 小山 哲, 丸屋 剛, 堀口賢一, 澤 健男: トンネル覆工コンクリートのひび割れ調査への画像解析技術の適用, セメント・コンクリート, No.748, pp.42-48, 2009.