# 論文 コンクリート開水路の断面修復における凍害ひび割れ発生範囲の特 定に関する検討

石神 暁郎\*1・蒔苗 英孝\*2・石岡 浩一\*3・佐藤 智\*4

要旨:積雪寒冷地におけるコンクリート開水路では,近年,劣化要因が凍害と推定される部材を対象とした 補修・補強が行われている。その場合における断面修復では,凍結融解により生じたひび割れの発生範囲を 特定することが重要となる。本研究では,開水路の通水表面からの深さ毎の超音波伝播速度を透過法により 測定し,さらに,ひび割れの発生程度を X 線 CT 法および蛍光エポキシ樹脂含浸法により算出して,それら の関係を調べた。本論では,超音波伝播速度の低下範囲とひび割れ発生程度の増加範囲との関係,ならびに ひび割れの発生範囲の特定における X 線 CT 法および蛍光エポキシ樹脂含浸法の適用性について考察した。 キーワード:開水路,凍害,超音波伝播速度,ひび割れ発生程度,X線 CT 法,蛍光エポキシ樹脂含浸法

# 1. はじめに

積雪寒冷地におけるコンクリート開水路では、近年、 その劣化要因が凍害と推定される部材を対象とした補 修・補強が行われている。この場合における補修・補強 では、開水路が保有する性能を元あった水準にまで回復 させることが求められる。そのため、部分的な改築を含 む、断面修復が実施される場合が多い<sup>1)</sup>。凍害を対象と した断面修復では、凍結融解により生じたコンクリート の劣化範囲、ひび割れの発生範囲を特定することが重要 となる。これらの範囲を特定することで、断面修復の前 処理として実施される劣化部除去作業における除去範囲 を適切に定めることができる。

凍結融解により生じたひび割れの発生範囲の特定で は、表面からの深さ毎に測定された超音波伝播速度より 相対動弾性係数を算出してその低下の程度を評価する方 法<sup>2)</sup>や、ひび割れ密度を指標としてその増加の程度を評 価する方法<sup>3)</sup>などが提案されている。しかしながら、実 構造物、特に開水路における適用事例は少なく、断面修 復を前提としたひび割れの発生範囲の特定方法の実用化 に際して、その適用性に関する検討は十分に行われてい るとは言い難い状況にある。

本研究では、開水路から採取した試験体において、通 水表面からの深さ毎の超音波伝播速度を透過法により測 定し、さらに、ひび割れの発生程度をX線CT法および 蛍光エポキシ樹脂含浸法により算出して、それらの関係 を調べた。そして、超音波伝播速度の低下範囲とひび割 れ発生程度の増加範囲との関係、ならびにひび割れの発 生範囲の特定におけるX線CT法および蛍光エポキシ樹 脂含浸法の適用性について考察した。

#### 2. 測定概要

#### 2.1 測定対象の概要

測定対象の概要を表-1に、代表的な現況を図-1に 示す。測定対象とした開水路は、いずれも北海道空知地 方に位置する幹線用水路であり、構造形式は RC 現場打 ちフリューム水路である。供用年数は最短の水路で 13 年、最長の水路で約50年であり、劣化状態の異なる複数 の水路を対象とした。試験体は、凍害による表面の変状 が著しいと考えられる、通水表面が南~西側に面した側 壁より採取した。試験体は、コア削孔により採取するこ ととし、コア採取は JIS A 1107 に準拠して行った。コア の直径は 100mm、高さは部材厚と同じ 200~250mm であ る。水路5路線より計 30 体を採取した。

水路名	構造形式	供用年数	試験体数
KJ 水路	RC 現場打ちフリューム	13 年	1 体
ST 水路	RC 現場打ちフリューム	19 年	1体
NN 水路	RC 現場打ちフリューム	27 年	8体
NG 水路	RC 現場打ちフリューム	40~50年	4 体
NO 水路	RC 現場打ちフリューム	45 年	16 体

表-1 測定対象の概要



(NG 水路) (NO ҡ

\*1 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地農業基盤研究グループ水利基盤チーム研究員 博士(農学) (正会員)
\*2 国土交通省 北海道開発局 農業水産部農業計画課 管理技術専門官
\*3 国土交通省 北海道開発局 札幌開発建設部農業整備課 上席農業開発専門官
\*4 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地農業基盤研究グループ水利基盤チーム主任研究員 (正会員)

#### 2.2 測定方法の概要

測定方法の概要(フロー)を図-2に示す。本研究で は,各試験体において,先ず,超音波法の一つである透 過法により通水表面からの深さ毎の超音波伝播速度を測 定した。次に,X線CT法により試験体断面の画像撮影 を行い、深さ毎の画素値を測定して密度を求めることに より,深さ毎のひび割れ発生程度を算出した。そして, 蛍光エポキシ樹脂含浸法により試験体断面の画像撮影を 行い、ひび割れを抽出して深さ毎のひび割れの面積比率 を求めることにより,深さ毎のひび割れ発生程度を算出 した。

### (1) 超音波伝播速度(透過法)

透過法では、コアの直径方向において超音波伝播速度 を測定した。試験体毎に、表面からの深さ5~105mmま での位置において 10mm 間隔で測定した。なお、伝播速 度は超音波試験機(プロセク社製 TICO 型)を用いて測 定した。

試験体毎の評価では,超音波伝播速度と相対動弾性係 数との関係について調べた既往の研究結果<sup>4),5)</sup>を参考に, 得られた伝播速度 V から式(1)および式(2)により相対動 弾性係数を算出し、劣化の程度の定量化を行った。

> $E_d = 4.0387 V^2 - 14.438 V + 20.708$ (1)

相対動弾性係数(%) =  $E_{dn} / E_{d0} \times 100$ (2)ここで、 $E_d$ は動弾性係数、 $E_{dn}$ は深さ nにおける動弾 性係数である。E<sub>d0</sub>は,試験体毎に算出された最大の動弾 性係数とした。

#### (2) ひび割れ発生程度(X線CT法)

X線 CT 法は, X線を用いたコンピュータ断層撮影法 であり, 医療や工業の分野で広く用いられている非破壊 試験法である。近年、硬化コンクリートに対する適用事 例も報告されており<sup>6)</sup>,測定対象物の内部を二次元ない し三次元で確認できるだけでなく,密度分布に関する情 報も得ることができる<sup>7)</sup>。本研究において X 線 CT 法は 産業用高エネルギーX 線 CT 装置(日立製作所社製 9MVCT 装置)を用いて行った。本装置では、一般的な 医療用X線CT装置で用いられるX線エネルギーに比べ 数十倍レベルでのエネルギー照射が可能であり、測定対 象物の密度にほぼ比例した画素値が得られる。ここで画 素値とは、X線吸収率、即ち画素の明るさ、画素の濃度 を表す指標である<sup>7)</sup>。密度が既知の測定対象物(空気: 0g/cm<sup>3</sup>, アルミニウム: 2.7g/cm<sup>3</sup>, 鉄: 7.9g/cm<sup>3</sup>) におけ る測定結果を図-3に示す<sup>8)</sup>。本装置により測定される 画素値と密度ρ'との関係式は、式(3)を用いた。

> (3)  $\rho' = 0.0008 \times math{matha}$

X線CT法による試験体断面の画像撮影は、試験体の 中央部において、表面に対して垂直に、鉛直方向の画像 が得られるように行った。なお、画素サイズは0.4mm×







図-3 密度が既知の測定対象物における測定結果<sup>8)</sup>

(本研究の試験体) 図-4 X線CT法による画像撮影の状況

0.4mm である。画素値は、画像毎に、表面からの深さ 5 ~105mm までの位置において 10mm 間隔で測定した。画 素値の測定では、汎用画像解析ソフトウェア(University Hospital of Geneva "Osiris") を用いた。深さ毎に測線 (Profile Line) を引き、測線毎に画素値(Pixel Value)の 平均値を求め、式(3)により測線毎の密度ρ'を求めた。Χ 線CT法による画像撮影の状況を図-4に示す。

画素値から求まる密度ρ'は、ひび割れの発生によって 低下するものである。このことから,密度ρ'をひび割れ 発生程度の判定指標の一つとした。

試験体毎の評価では、画素値から求められた密度ρ' を用い式(4)から相対密度を算出し、劣化の程度の定量化 を試みた。

相対密度(%) =  $\rho'_n / \rho'_0 \times 100$ (4) ここで、 $\rho'_n$ は深さ n における密度である。 $\rho'_0$ は、 試験体毎に算出された最大の密度とした。

(3) ひび割れ発生程度(蛍光エポキシ樹脂含浸法)

蛍光エポキシ樹脂含浸法は、劣化を受けたコンクリー ト構造物から採取した試験体に蛍光染料を添加した超低 粘度形注入用エポキシ樹脂(粘度 100±50mPa·s (20℃)) を低真空状態(約1/100気圧)で注入・硬化させ、試験 体の切断面に紫外線を照射して微細ひび割れなどを可視 画像として評価するものであり、コンクリートの酸劣化 <sup>9)</sup>, 凍害<sup>10)</sup>, アルカリシリカ反応<sup>11)</sup>などにおいて評価実 績を有する手法である。

本研究では、先ず、試験体の中央部において、表面に 対して垂直に, 鉛直方向の断面が得られるように切断を



行った。その後、蛍光エポキシ樹脂含浸法により蛍光染 料を添加したエポキシ樹脂を注入・硬化させ、上述の切 断面から厚さ10mmの位置でスライス切断を行った。画 像撮影は、このスライス切断面において行った。既往の 研究結果 8)を参考に、ひび割れは、画像毎に、表面から の深さ 0~40mm, 40~80mm, 80~120mm の各範囲で抽 出した。ひび割れの抽出では、汎用画像処理ソフトウェ ア(Adobe "Photoshop Elements")を用いた。画像をグレ ースケール化して 256 階調の濃淡画像を作成し、しきい 値128で2値化して画素数からひび割れの面積を求め、 範囲毎の面積比率を求めた。

試験体の切断面の面積に対するひび割れの面積比率 は、ひび割れの発生によって増加するものである。この ことから、ひび割れ面積比率をひび割れ発生程度の判定 指標の一つとした。

# 測定結果および考察 3.1 試験体毎の評価結果

凍害による表面の変状が比較的大きい側壁から採取し た試験体の測定結果を図-5に、表面の変状が比較的小



さい側壁から採取した試験体の測定結果を図-6に,表 面の変状がみられない側壁から採取した試験体の測定結 果を図-7に示す。各図ともに,上段が相対動弾性係数, 相対密度およびひび割れ面積比率の測定結果,中段が X 線 CT 法による撮影画像,下段が蛍光エポキシ樹脂含浸 法による撮影画像である。上段の図において、相対密度 の算出に際しては,骨材によるものと判断される数値(密 度 2.5g/cm<sup>3</sup>以上, 画素値 2.5/0.0008=3,125 以上) を除外 している。一方、空隙によるものと判断される数値は除 外していない。これは、凍結融解により生じた空隙(ひ び割れ)とそれ以外の原因で生じた空隙とを分離するこ とが困難なためである。また、ひび割れ面積比率は、2% 未満の場合は白色,2%以上4%未満の場合は灰白色,4% 以上の場合は灰色で着色して示している。これは、得ら れたひび割れ面積比率の最大値が 7.4%であり、また、撮 影画像が、目視上、ひび割れがほぼみられない場合、抽 出範囲のほぼ全面にみられる場合、その中間程度にみら れる場合,の3つの種類に大別できたためである。なお、 中段および下段の図中の破線は、表面からの深さ 120mm の位置を表わしている。

図-5からは、表面の変状が比較的大きい側壁から採 取した試験体では、相対動弾性係数および相対密度の低 下範囲は概ね一致するものの,総じて低下の程度は低く, 総じて増加の程度が高くなったひび割れ面積比率の増加 範囲とは一致しないことが分かった。本研究では、相対 動弾性係数および相対密度は、試験体毎に算出された最 大の動弾性係数または密度に対する表面からの深さ毎の 動弾性係数または密度としている。しかし、開水路は一 般に部材厚が薄く、最大の動弾性係数や密度であっても 劣化していないコンクリートの動弾性係数や密度である とは限らない。測定範囲全体の動弾性係数または密度が 低下したため、相対動弾性係数および相対密度の低下が みられなかったものと考えられる。このように変状が大 きい場合では、透過法により相対動弾性係数を、X線CT 法により相対密度を算出するだけでなく、蛍光エポキシ 樹脂含浸法によりひび割れ面積比率を求めることが有効 である。本研究において採取した試験体では,計30体の 内,6体がこのタイプに分類された。

図-6からは、表面の変状が比較的小さい側壁から採 取した試験体では、相対動弾性係数の低下範囲と相対密



度の低下範囲が,必ずしも一致しない場合があることが 分かった。超音波伝播速度は、コンクリートの劣化状態 に影響を受けるが、劣化により低下した品質の影響を直 接的に受けて低下する場合のほか、劣化したコンクリー トを迂回することにより伝播距離が延長して低下する場 合もある。そのため、超音波法の一つである透過法では、 予定した測定位置において測定できていない可能性も考 えられる。これに対してX線CT法では、測線は常に直 線とすることができるため、予定した測定位置における 測定をより正確に行うことができるものと考えられる。 このことから、超音波伝播速度から算出される相対動弾 性係数の低下範囲と密度から算出される相対動弾 性係数の低下範囲と密度から算出される。本研究に おいて採取した試験体では、計 30 体の内、23 体がこの タイプに分類された。

図-7からは、表面の変状がみられない側壁から採取 した試験体では、相対動弾性係数および相対密度の低下 範囲は概ね一致するものの、ひび割れ面積比率の増加範 囲は一致せず、また、面積比率自体に増加がほとんどみ られない場合があることが分かった。蛍光エポキシ樹脂 含浸法では、抽出できるひび割れには一定の幅と連続性 が求められる。この事例では、連続性がない微細ひび割 れが存在したため、ひび割れを抽出できなかったものと 考えられる。本研究において採取した試験体では、計30 体の内、1 体のみこのタイプに分類された。

#### 3.2 超音波伝播速度とひび割れ発生程度との関係

超音波伝播速度と密度 $\rho$ 'との関係を図-8に,超音波 伝播速度とひび割れ面積比率との関係を図-9に,ひび 割れ面積比率と密度 $\rho$ 'との関係を図-10に示す。各図 ともに,超音波伝播速度および密度 $\rho$ 'では表面からの深 さ15mm,55mm,95mmの各位置の値を,ひび割れ面積 比率では表面からの深さ $0\sim40$ mm, $40\sim80$ mm, $80\sim$ 120mmの各範囲の値を,それぞれ対応させて示している。 超音波伝播速度および密度 $\rho$ 'では,ひび割れ面積比率に おいて抽出範囲としている40mmの中で,範囲の中心に 近い2つの測定位置の内,表面に近い位置の値を用いる こととした。

各図では,超音波伝播速度が低くなるほど,密度ρ, は低くなり,また,ひび割れ面積比率は高くなった。上 述のように,超音波伝播速度もしくは密度が低下する要 因,またはひび割れ面積比率が増加する要因は各々異な るため,その相関性はいずれも低いものの,変状の程度 により,超音波伝播速度の低下範囲からひび割れ発生程 度の増加範囲を予測できる可能性があること,また逆に, ひび割れ発生程度の増加範囲から超音波伝播速度の低下 範囲を予測できる可能性があることが,それぞれ示唆さ れた。



図-9 超音波伝播速度とひび割れ面積比率との関係

#### 3.3 X線 CT 法および蛍光エポキシ樹脂含浸法の適用性

X線 CT 法は、測線を直線とすることができるため、 予定した測定位置における測定を行うことができる。また、密度を求めることで、連続性がない微細ひび割れや 直接視認することが難しい潜在的な劣化などに対しても 適用できる可能性がある。一方、劣化していないコンク リートの密度をどの測点のどの深さの画素値で算出する かを定める必要がある。

蛍光エポキシ樹脂含浸法は、変状が大きい場合に有効 である。抽出できるひび割れには一定の幅と連続性が求 められるものの、ひび割れを直接視認することができる という利点を有する。一方、連続性がない微細ひび割れ などに対しては適用することが難しいため、透過法や X 線 CT 法を併用する必要がある。

#### 4. まとめと今後の課題

本研究の結果から、以下の結論を得た。

- (1) 超音波伝播速度が低くなるほど、密度 $\rho$ 'は低くなり、 また、ひび割れ面積比率は高くなった。
- (2) 変状の程度により,超音波伝播速度の低下範囲から ひび割れ発生程度の増加範囲を,また逆に,ひび割 れ発生程度の増加範囲から超音波伝播速度の低下範 囲を,予測できる可能性があることが示唆された。
- (3) X線CT法は、予定した測定位置において測定を行う ことができること、連続性がない微細ひび割れや直 接視認することが難しい潜在的な劣化などに対して も適用できる可能性があることが分かった。
- (4) 蛍光エポキシ樹脂含浸法は、変状が大きい場合に有効であること、ひび割れを直接視認することができることが分かった。

今後は、透過法、X線 CT法、蛍光エポキシ樹脂含浸 法の各方法により特定されたひび割れの発生範囲に基づ き、劣化部除去作業における除去範囲を定め、断面修復 を実施した後の断面修復材の耐久性を調べることにより、 各方法の適用性を検証することが重要である。そのため、 超音波伝播速度、密度ρ'、ひび割れ面積比率と破壊に対 する抵抗性との関係、また、通水表面におけるカルシウ ム成分の溶出や炭酸化など、開水路に特有の劣化要因が これらの指標に与える影響を調べる必要があるものと考 えられる。

# 参考文献

- 例えば、稲葉健司、國見圭嗣:コンクリート開水路の凍害対策工法の施工事例、第61回農業農村工学会北海道支部研究発表会講演集,pp.24-29,2012.10
- 例えば、遠藤裕丈、田口史雄、林田 宏、草間祥吾: 非破壊による凍害深さの評価、コンクリートの凍結



図-10 ひび割れ面積比率と密度ρ'との関係

融解抵抗性の評価方法に関するシンポジウム論文 集, pp.293-298, 2008.8

- 例えば、齋藤憲寿、加賀谷誠:凍結融解作用を受けたかぶりコンクリートのひび割れ密度の深さ方向分布、コンクリート工学年次論文集、Vol.34、No.1、 pp.628-633、2012.7
- 緒方英彦,服部九二雄,高田龍一,野中資博:超音 波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1563-1568, 2002.6
- 5) 緒方英彦,野中資博,藤原貴央,高田龍一,服部九 二雄:超音波法によるコンクリート製水路の凍害診 断,コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関 するシンポジウム論文集,pp.63-70,2006.12
- 例えば、天明敏行・堤 知明・村上祐治・尾原祐三: X線CT法によるコンクリート供試体の非破壊検査、 コンクリート工学年次論文集、Vol.25、No.1、 pp.1643-1648, 2003.7
- 7) 上村 博:産業用高エネルギーエックス線 CT 装置 による製品欠陥検出,溶接技術, pp.68-72, 2013.3
- 石神暁郎,佐藤 智,中村和正,緒方英彦,周藤将 司:X線CT法によるコンクリートの内部変状の評 価,第62回農業農村工学会北海道支部研究発表会 講演集,pp.60-63,2013.10
- 9) 岩城圭介,加藤淳司,平間昭信,塩谷智基:微視的 断面観察による酸劣化したコンクリートの微細構 造の評価,コンクリート工学年次論文集,Vol.26, No.1, pp.999-1004, 2004.7
- 10) 手塚喜勝,朝倉啓仁,中村眞一,佐々木元茂:蛍光 エポキシ樹脂含浸法によるコンクリートコアサン プルの微細ひび割れの可視化手法,土木学会北海道 支部論文報告集,第61号,V-10,2005.2
- 近藤悦郎,関下裕太,朝倉啓仁,手塚喜勝:蛍光エ ポキシ樹脂含浸法による微細ひび割れ観察の適用 事例,第65回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.733-734,2010.