

# 論文 凍害劣化した RC 開水路におけるひび割れ注入工法による内部変状の評価

周藤 将司\*1・緒方 英彦\*2・石神 暁郎\*3・佐藤 智\*4

**要旨** : RC 開水路に代表される薄肉構造物では、凍害によるひび割れが部材表面と内部でそれぞれ異なる方向に生じることが既往の研究によって明らかになっている。本研究では、凍害の生じた RC 開水路側壁に注入工法を実施し、内部変状である層状ひび割れへの注入材充填前後の超音波伝播速度の変化から層状ひび割れの範囲の定量的評価方法について検討した。また、側壁の切断面と採取コアから注入材の充填度合いと層状ひび割れの分布や方向、連続性についての考察を行った。結果として、層状ひび割れは、斜め方向に角度を持って連続して生じており、天端に近づく程より深い部分へ進行していることなどが明らかとなった。

**キーワード** : 凍害, RC 開水路, 内部変状, 層状ひび割れ, 注入工法, 超音波伝播速度

## 1. はじめに

コンクリートのひび割れ補修工法のひとつに注入工法がある。注入工法は、防水性・耐久性の向上のほか、躯体の一体化を図ることを目的として広く用いられている工法である<sup>1)</sup>。注入工法を表面のひび割れに対して施工する場合には、ひび割れが目視によって確認可能であるため比較的確実に注入材の充填を行うことができる。一方、内部のひび割れに対して施工する場合には、ひび割れや空隙の箇所、範囲が不明確であるために、注入材の充填が十分になされているか否かの判断を定量的に行うことは難しい。充填範囲の確認は、定性的な評価として他の注入孔からの注入材の漏出によって確認されるが、定量的な評価方法は確立されておらず、これが課題として挙げられる。

積雪寒冷地の RC 構造物にひび割れを発生させる劣化としては、凍害が挙げられる。凍害劣化による変状の発生形態は構造物の形式や供用される環境によって異なることが報告されており、特に RC 開水路に代表される薄肉構造物については、凍害によるひび割れが部材表面と内部でそれぞれ異なる方向に生じることが既往の研究から明らかになっている<sup>2)</sup>。RC 開水路の側壁における表面変状のひび割れは、長手方向に延びる形態であり、主に灌漑期における気中部に生じ、目視によって確認することが可能である。一方、内部変状のひび割れには、部材断面に対して層状に進展する形態があり、目視や超音波法による評価手法が検討されている<sup>3)</sup>が、層状ひび割れの連続性や発生メカニズムについては現在明らかになっていない。著者らの既往の研究では、開水路側壁の一部を水平方向に切断し、切断面から層状ひび割れが側壁表

面側に多く発生していることやひび割れが連続性を持っていることを確認している<sup>4)</sup>。しかし、高さ方向での層状ひび割れの分布や連続性については確認されていない。

そこで本研究では、凍害の生じた RC 開水路側壁を対象に注入工法を実施し、層状ひび割れへの注入材充填前後の超音波伝播速度の変化から層状ひび割れの範囲の定量的評価方法について検討した。また、試験ブロックを水平方向に切断し、コア供試体と合わせて注入材の充填度合いと層状ひび割れの分布や方向、連続性についての考察を行った。

## 2. 注入試験概要

### 2.1 試験用ブロック概要

本試験で用いたブロックは、昭和 40 年代に築造され北海道内で供用されている RC 構造の現場打ちフリーム水路の側壁である。側壁の表面は南向きに面しており、背面は土中に埋もれた状態で供用されていた。この水路の 1 バレルの幅は約 8m、高さは 2.4m、側壁上端の厚さは 0.2m、ハンチ上端の厚さは 0.3m である。試験は同一バレル内で幅 1.5m のブロックを 2 枚切り出し、実験室に搬入して行った。ブロックの切り出しについては、目地部に存在する止水板を考慮して、バレルの下流側目地から 0.2m 離れた箇所を基線として上流側に向かって 1.5m 間隔で切断作業を行った。写真-1 に側壁の表面状況と切り出し位置を示す。

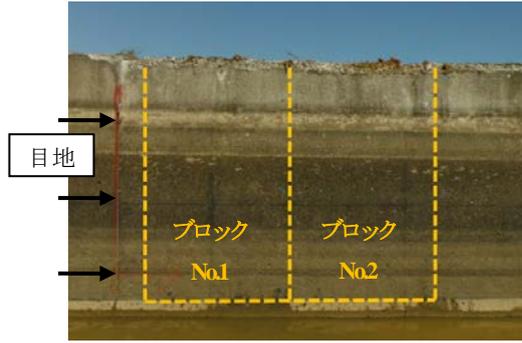
表面変状としては、気中部において凍害劣化による長手方向に延びるひび割れが確認された。また、目地に近い箇所では、目地から斜めに立ち上がるひび割れも確認された。このひび割れは、凍害の影響のみではなく躯体

\*1 鳥取大学大学院 連合農学研究科生物環境科学専攻 (正会員)

\*2 鳥取大学 農学部生物資源環境学科准教授 博士 (農学) (正会員)

\*3 (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)

\*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)



写真一 水路側壁の表面状況及び切り出し位置

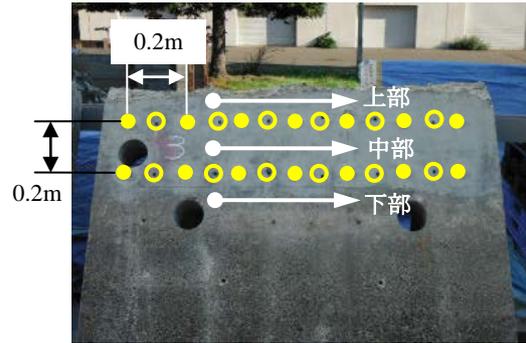
の温度変化に対する体積変化が目地によって拘束されるために生じた応力に起因したひび割れであると考えられる。水中部では、流水による摩耗の影響で骨材露出が目立つがひび割れの発生は確認されなかった。ブロックの天端ではスケーリングによる骨材の剥離が進行しており、一部では配力筋が露出している箇所も確認された。

## 2.2 注入試験方法

注入試験は、次の手順で行った。まず、ブロックの下部処理としてグラインダーによる表面の研磨を行った。次に、2枚のブロックの気中部に縦、横それぞれ0.2m毎に2行7列、計14カ所に注入孔を削孔し、注入台座を取り付けた。1行目が上段、2行目が下段である。また、注入台座取り付け用孔とは別に空気抜き用孔を注入孔の水平方向中間点に計12カ所削孔した。いずれの孔も径は10mm、深さは約100mmである。写真一2に削孔位置を示す。注入台座取り付けの際には、注入材を確実に層状ひび割れに充填し、表面ひび割れからの注入材の漏出を防ぐためにエポキシ樹脂系のパテ材によって表面ひび割れの箇所をシールした。その後、注入孔の上段の上部（以下、上部）、上下段の中央部（以下、中部）及び下段の下部（以下、下部）の計3カ所で超音波法の表面走査法による超音波伝播速度の測定を行った。表面走査法の測線を写真一2中に合わせて示す。超音波法の測定には、振動子周波数54kHz、発・受振子の直径50mmの超音波測定器を用いた。表面走査法の測定では、まず発振子を起点に設置し、受振子を起点から水平方向に50～500mmまで50mmずつ移動させて設置して計10点で超音波伝播速度の測定を行った。表面走査法の結果からは、式(1)を用いて凍害劣化深さの推定を試みた。

$$t = \frac{X_0}{2} \sqrt{\frac{V_s - V_d}{V_s + V_d}} \quad (1)$$

$t$ : 劣化部の厚さ (mm),  $V_d$ : 劣化部の超音波伝播速度 (km/s),  $V_s$ : 健全部の超音波伝播速度 (km/s),  $X_0$ : 直線の傾きが変わる位置 (mm)

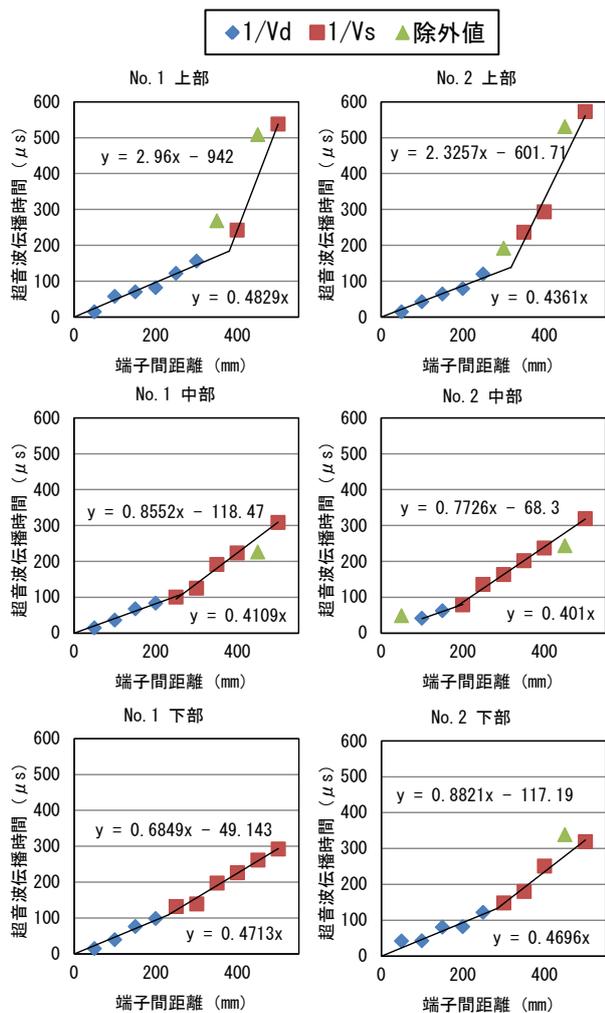


写真二 注入孔削孔位置（白抜きは空気抜き用孔、また白線は表面走査法の測線を示す）

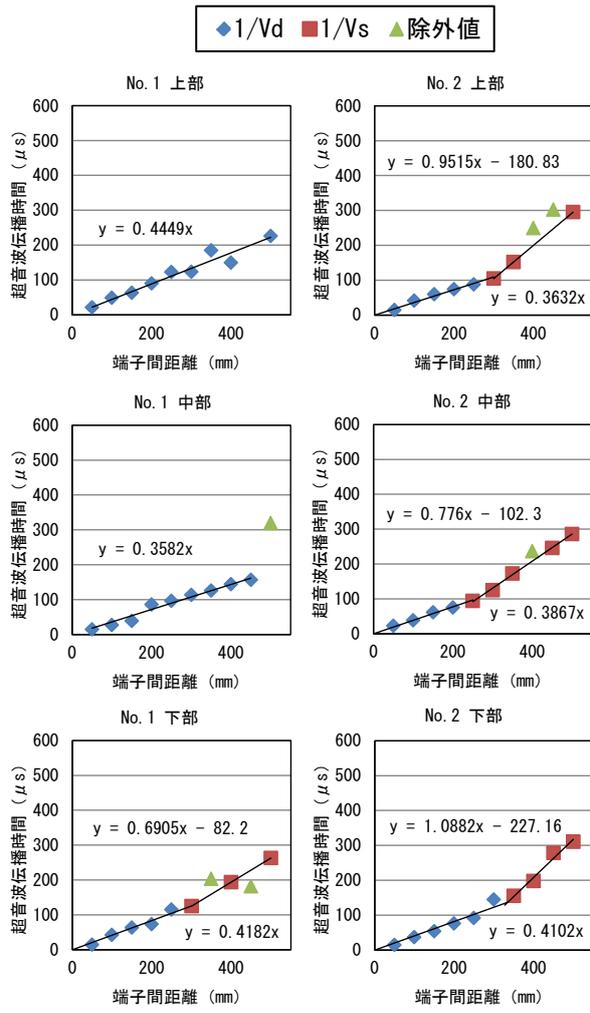
遠藤らは、コンクリートの表層に劣化部が存在し、内部に健全部が存在する場合に表面走査法の試験結果から式(1)を用いて凍害劣化深さを一定の精度で推定することが可能であることを示している<sup>5)</sup>。また、近年の研究では、層状ひび割れを伴う凍害劣化が生じている場合に式(1)のルート内が負の値を示し、劣化深さの推定を行うことができない事例が報告されている<sup>3, 4)</sup>。

超音波伝播速度の測定後は、注入材充填前のコンクリートの物性を確認するために両ブロックの気中部からコア供試体を採取した。コア採取はJIS A 1107-2002に準拠して行い、コア径は100mmとした。注入材の充填は、コア供試体の採取後に行った。本試験では注入材として、目地側のブロック（以下、ブロックNo.1）に対して有機系材料を、中央側のブロック（以下、ブロックNo.2）に対して無機系材料をそれぞれ用いた。試験で用いた有機系材料はJIS A 6024〈建築補修用注入エポキシ樹脂〉硬質形（I）低粘度形及び国土交通省土木補修用エポキシ樹脂注入材1種適合品の低粘度形エポキシ樹脂であり、無機系材料は超微粒子セメントを主成分とするプレミックスセメントである。注入の際に有機系材料には、採取後のコア側面から充填範囲を目視観察するために、蛍光塗料をエポキシ樹脂の重量比0.3%混入した。用いた注入器具は、容量100mlの低圧注入器具である。

注入材の充填後の試験は、注入材の硬化を確認した1日後に行った。注入材の硬化は、注入器具に残存した注入材の状態から判断した。注入材充填後は、注入材充填前と同じ3カ所で超音波伝播速度の測定を行い、その後コア供試体の採取を行った。コア供試体の採取方法・条件は注入材充填前と同様である。採取したコア供試体については、側面から内部変状と注入材充填状況を目視で確認し、透過法による深さ方向の超音波伝播速度の測定を行った。その後、ブロックNo.1の上段注入孔削孔ライン上でブロックを切断し、層状ひび割れの分布や連続性を注入材の充填度合いと合わせて目視観察を行った。



図一 注入材充填前の超音波伝播時間



図二 注入材充填後の超音波伝播時間



【ブロック No. 1 側面】 【ブロック No. 2 コア孔】

写真-3 注入材漏出状況

### 3. 試験結果と考察

#### 3.1 注入材の充填度合い

注入材の充填は、ブロック No.1において比較的多量になされた。ブロック No.1については、上段7カ所の注入孔の内3カ所については充填の過程で注入器具に注入材を一度注ぎ足しており、空気抜き用孔や目地側側面の層状ひび割れが確認される箇所から注入材の漏出が確認された(写真-3左)。ブロック No.2については、空気抜き用孔からの漏出は確認されなかったが、コア採取跡からひび割れに沿って水分の漏出が確認された(写真-3右)ことから、注入材の充填が示唆された。注入材の充

填状況からは層状ひび割れは目地に近い箇所でも多く発生しており、その要因としては2.1節で述べた目地から立ち上がるひび割れが凍結融解作用を受けることで拡大し、連続したひび割れとなったことが考えられる。

#### 3.2 注入材充填前後の超音波伝播速度の変化

注入材充填前の表面走査法の測定結果を図-1に、注入材充填後の表面走査法の測定結果を図-2にそれぞれ示す。図中の2直線の回帰式は既往のプログラム<sup>6)</sup>によって決定した。2直線の決定では、まず全測定値を用いて2直線に分類した後、直線の値と10%以上の差異が生じた値を除外値として改めて回帰式を求めた。 $V_d$ 、 $V_s$ は回帰式の傾きの逆数によって求められる。表面走査法の測定結果から求めた超音波伝播速度 $V_d$ 、 $V_s$ を表-1に示す。図-2においてNo.1の上部と中部は、2直線による回帰を行った際に傾きの差が0.1以下の僅かなものであったため1本の直線と見なした。

本試験では全ての測線で $V_d > V_s$ の関係となり、式(1)によって凍害劣化深さの推定を行う条件である $V_d < V_s$ の関係となる箇所は確認されなかった。この結果は既往の研究<sup>3, 4)</sup>で報告されているものと同様の傾向であり、

表一 表面走査法から求めた超音波伝播速度 (m/sec)

測点	充填前		充填後	
	$V_d$	$V_s$	$V_d$	$V_s$
No.1 上部	2070	340	2250	
No.1 中部	2430	1170	2790	
No.1 下部	2120	1460	2390	1450
No.2 上部	2290	430	2750	1050
No.2 中部	2490	1290	2590	1290
No.2 下部	2130	1130	2440	920

内部に層状ひび割れが存在することが示唆される結果となった。図一1においては、2直線の傾きの差は上部が最も大きく、下部の方が小さくなる傾向を示した。 $V_d$ 、 $V_s$ の差は層状ひび割れの発生程度によって生じたものであると考えられ、層状ひび割れは伝播速度が遅くなる上部により多く生じていると考えられる。

図二においては、上部と中部で図一1と比較して緩勾配になり伝播速度が速くなる傾向を示した。これは、超音波パルスの透過が阻害されていたひび割れの箇所が注入材によって充填されたことで、超音波パルスの直線的な透過経路が確保されたためであると考えられる。また、下部では、上述の傾向は確認されなかったことから注入材が充填されなかった箇所であると考えられる。No.1の上部と中部では、表面部と内部において速度の差が無くなり、直線のグラフとなった。この2測点は注入材の充填が多くなされた箇所と一致するため、注入材による充填が十分になされれば層状ひび割れが生じていた側壁内部であっても表面部と同等な伝播速度を得られる可能性が示唆される結果となった。また、この傾向を利用することで、内部の層状ひび割れへの注入材の充填範囲及び層状ひび割れの範囲を推定することが可能であると言える。

### 3.3 コア供試体及びブロック切断面による考察

#### (1) コア供試体の削孔位置及び状態

写真一4に気中部のコア供試体削孔位置を示す。コア供試体は、各ブロックの注入孔直上と注入孔近辺で注入材の充填がなされた、あるいはなされたと思われる箇所から採取した。また、凍害による劣化が生じていない箇所の超音波伝播速度を確認するため、層状ひび割れの発生が無いブロック No.1の水中部からもコア供試体を採取した。加えて、前述の通りコア供試体の採取は、注入材の充填前にも行っている。採取したコア供試体の目視情報を表二に示す。No.2-bについては、コア供試体側面の目視観察からは注入材の充填は確認できなかったが、写真一3より注入材の充填が示唆されるためここでは不明と記載した。



【ブロック No.1】



【ブロック No.2】

写真一4 コア供試体削孔跡（気中部）

表二 採取したコア供試体の目視情報

No.	ひび割れ	注入材の充填
No.1-a	有り	—
No.1-b	有り	有り
No.1-c	有り	有り
No.1-d	有り	無し
No.1-水中部	無し	—
No.2-a	有り	—
No.2-b	有り	不明



【ブロック No.1-a】

【ブロック No.2-a】



【ブロック No.1-水中部】



【写真の見方】

写真一5 注入材充填前に採取したコア供試体

写真一5に注入材充填前に採取したコア供試体を示す。ブロック No.1-aでは表面側に複数の層状ひび割れが確認され、No.2-aでは背面に近い側においても層状ひび割れが確認された。一方、水中部から採取したコア供試体からは、ひび割れは確認されなかった。

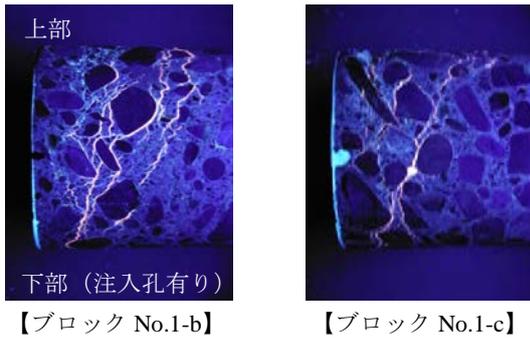


写真-6 注入材充填後に採取したコア供試体  
(ブラックライト照射による撮影)

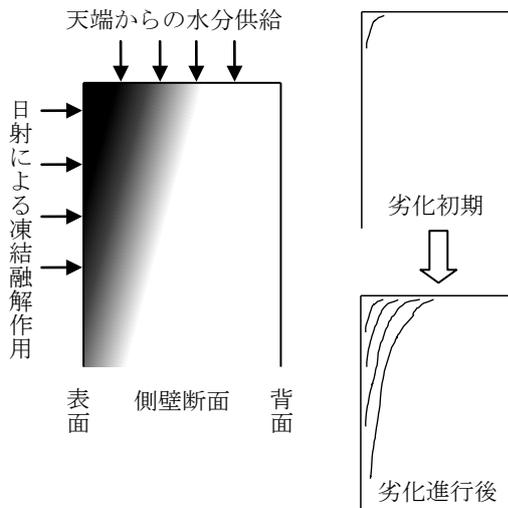
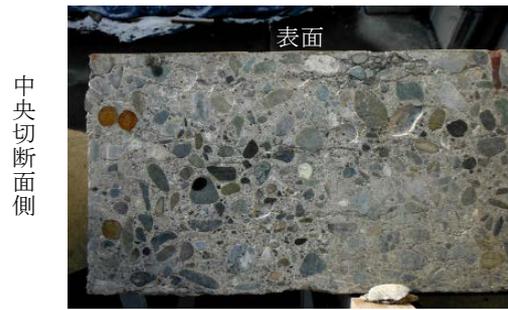


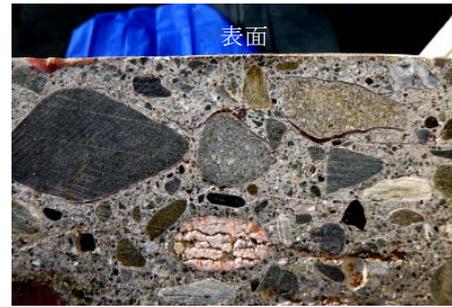
図-3 層状ひび割れの発生過程イメージ図

写真-6 に注入材充填後に採取したコア供試体を示す。ブロック No.1-b, c では、注入材が供試体の斜め方向に充填されていることが確認された。コア供試体のひび割れは、上部側において表面付近から内部まで発生していることが確認されるが、下部側では表面付近のみに発生している。このことから、水路側壁の層状ひび割れは、斜め方向に連続して発生していることが明らかになった。

層状ひび割れが斜め方向に生じる要因としては、次の通り考えられる。水路側壁の凍結融解作用は、日射の影響を面的に受ける水路表面側において卓越し、繰返して凍結融解作用を受けることで表面側から組織の緩みが生じる。一方、層状ひび割れは、既往の研究<sup>3)</sup>において天端のスケーリングによる影響から水分の通り道となる部位で発生しやすいことが明らかとなっている。天端からの水分の供給は、同じ気中部においても天端に近い上部の方がより多く受けると言える。凍結融解作用によって組織の緩みの生じた部位に水分の供給が多くなることで、骨材とモルタルの界面からひび割れが進行し次第にそれらが連続していくと考えられる。初期の段階でこの影響を受ける箇所は表面側の最上部であり、その後は次第に



【中央付近 (注入材の充填無し)】



【目地側 (注入材の充填有り)】

写真-7 ブロック切断面

下部、内部の双方向にひび割れが増大していくと予測される。したがって層状ひび割れは、図-3 に示すように表面に対して角度を持った状態で進展すると考えられる。

このひび割れの発生過程は、室内試験においてコンクリート供試体に凍結融解作用を施して実構造物のひび割れの発生過程を再現した既往の研究<sup>7)</sup>とも一致する。既往の研究では、劣化因子である凍結融解作用の影響を大きく受ける供試体の隅角部や縁部から層状ひび割れが進行し、次第に表層の剥離が生じることを明らかにしており、本研究において実構造物の場合でも劣化因子の影響が大きくなる箇所から層状ひび割れが進行することが確認された。

## (2) ブロック切断面の状態

写真-7 にブロック No.1 の切断面の一部を示す。層状ひび割れは、切断面全域に渡ってブロック表面側に多く確認された。ひび割れの発生程度については、目視上ではブロックの目地側と中央側において同等に確認された。しかし、注入材の充填跡は目地側でのみ確認されており、ひび割れの連続性については目地側と中央側において異なっていた。注入材充填時には目地側側面から漏出が確認されたことから、特に目地側では多くの連続した層状ひび割れが存在していたと考えられる。

## (3) コア供試体の超音波伝播速度

図-4 にコア供試体の透過法による深さ方向の超音波伝播速度の測定結果を示す。深さ方向の測定は超音波端子を 10mm ずつ移動させて行った。No.1-a については、表面から 40mm の深さまではひび割れの発生が顕著であったために測定不可であった。

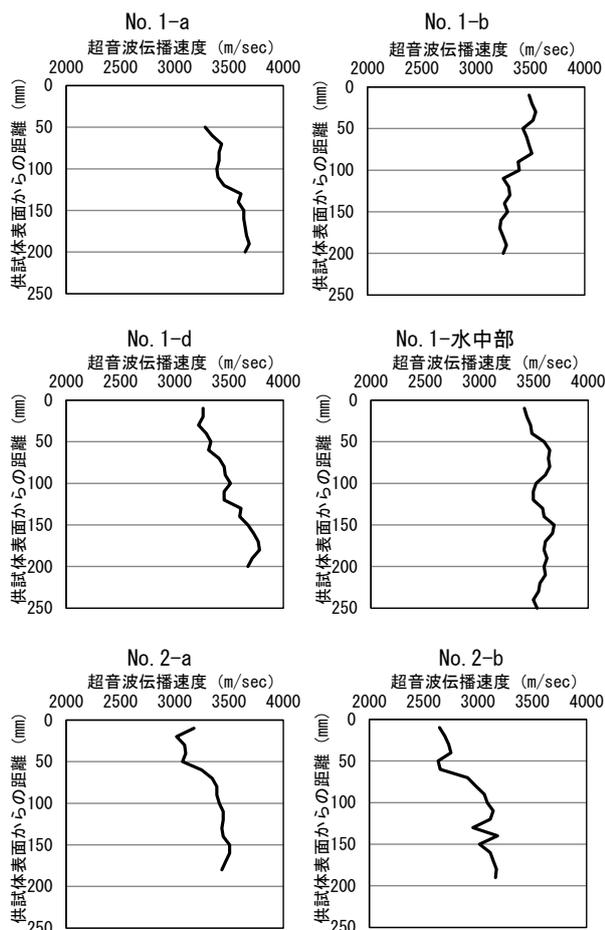


図-4 コア供試体の超音波伝播速度

ひび割れの生じていない No.1-水中部においては、深度に関係なく概ね 3500m/sec 付近で安定した値が得られた。注入材の充填の影響の無い No.1-a, d, No.2-a については、深度が進むにしたがって超音波伝播速度が速くなる傾向を示した。これは、図-3 に示す通り表面側から劣化が進行しているためであると考えられる。No.1-b については、表面側で超音波伝播速度が速くなることが確認された。超音波伝播速度の値は深さ 100mm を境界として変化しており、100mm までの深さではひび割れの生じていない No.1-水中部と同等な値を示した。また、伝播速度の境界となる 100mm は、本試験で設けた注入孔の深さと一致している。したがって、深さ 100mm までの測点では、ひび割れ部に注入材が充填されたことによって超音波パルスの透過経路が確保され、100mm 以深の伝播速度と比較して大きな値を示したと考えられる。

No.2-b については注入材の充填が示唆されていたが、伝播速度の示す傾向は No.2-a と同様であり、深さ 100mm までの伝播速度の増大は確認されなかった。これより、ブロック No.2 においては、注入材充填前後で大きな差が生じなかった表面走査法の結果からも、充填された注入材の量が十分ではなかったために超音波パルスの透過経

路の改善には至らなかったのではないかと考えられる。

#### 4. おわりに

本研究から得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 層状ひび割れは、水路表面に対して水平ではなく、斜め方向に角度を持って連続して生じており天端に近づく程より深い部分へ進行している。
- (2) 表面走査法による超音波伝播速度の測定では、注入材の充填によって表面部と内部で伝播速度の差が無くなり、ほぼ一定の値を示す。
- (3) 注入材の充填範囲は (2) の傾向の把握によって推定することが可能であり、同時に層状ひび割れの範囲も推定することが可能である。
- (4) 透過法による超音波伝播速度の測定では、伝播速度は注入材の充填によって速くなり、ひび割れの生じていない状態のコンクリートと同等な値を示す。

#### 謝辞

本研究の実施に際しては、新潟大学自然科学系（農学部）の鈴木哲也准教授、山岸俊太郎氏から多大なるご協力を得た。ここに記して謝意を示す。

#### 参考文献

- 1) 社団法人 日本コンクリート工学協会：『コンクリート診断技術 '09 [基礎編]』, pp.243-245, 2009
- 2) 緒方英彦, 高田龍一, 鈴木哲也, 山崎大輔, 佐藤周之：RC 開水路の側壁内部における凍害ひび割れの発生形態, 農業農村工学会誌, Vol.78, No.5, pp.29-33, 2010
- 3) 緒方英彦, 金田敏和, 石神暁郎, 周藤将司：凍結融解作用による開水路側壁の内部変状に対する目視調査および超音波試験の考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, pp. 892-897, 2012
- 4) 周藤将司, 緒方英彦, 石神暁郎, 金田敏和：凍害劣化の生じた RC 開水路側壁のひび割れに対する注入工法の適用性と超音波法による充填部の評価, セメント・コンクリート論文集, Vol.66, pp.296-302, 2013
- 5) 遠藤裕丈, 田口史雄, 林田宏：コンクリートの凍害劣化の簡易診断技術に関する基礎的研究, 寒地土木研究所月報, Vol.690, pp.15-22, 2010
- 6) 二本の直線による折れ線回帰, 群馬大学 HP, <http://aoki2.si.gunma-u.ac.jp/lecture/stats-by-excel/vba/html/oresen-kaiki.html>
- 7) 森田匡隆, 周藤将司, 緒方英彦, 高田龍一：凍結融解作用によるコンクリート開水路の表面変状の発生形態, コンクリート工学年次論文集 Vol.33, pp.911-916, 2011