

# 論文 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

緒方 英彦<sup>\*1</sup>・金田 敏和<sup>\*2</sup>・石神 暁郎<sup>\*3</sup>・周藤 将司<sup>\*4</sup>

**要旨:** 積雪寒冷地のコンクリート開水路の側壁には、側壁の構造形式および供用される環境条件に応じて、表面変状である表面ひび割れおよび内部変状である層状ひび割れが発生するが、内部変状の診断手法は未確立である。本研究では、表面変状の特徴から内部変状の発生箇所を定性的に診断するための目視調査の手法を検討し、表面ひび割れの形態が下に凸の箇所が発生可能性が高いことを明らかにした。また、表面走査法による超音波試験により内部変状を診断するための手法を検討し、部材内部に層状ひび割れが発生している場合の測定値の傾向について考察を加えた。

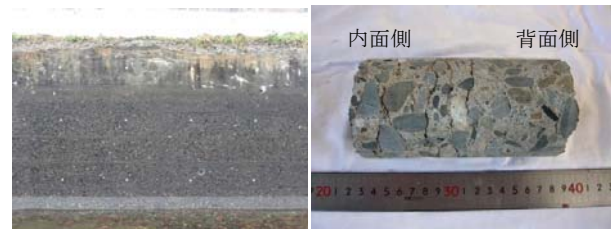
**キーワード:** 開水路, 凍害, 目視調査, 超音波試験, 表面変状, 内部変状, ひび割れ形態

## 1. はじめに

積雪寒冷地におけるコンクリート開水路の側壁には、側壁の構造形式および供用される環境条件に応じて、写真-1に示すような表面変状、内部変状が発生している<sup>1)</sup>。コンクリート開水路の長寿命化を図るための対策を的確に策定するためには、これらの変状を正確に診断しなければならないが、表面変状である表面ひび割れは目視調査でその劣化程度を容易に診断できるものの、内部変状である層状ひび割れは定量的調査だけでなく定性的調査の手法も未確立である。側壁を部材厚方向に割るような形態で発生する層状ひび割れは、側壁の耐久性および安全性にも影響を及ぼすことから、その診断手法の確立が望まれている。

表面変状と内部変状は、ひび割れの発生方向が異なることから、それぞれのひび割れの発生原因となる応力の作用方向が異なることがわかる。このように両者は異なる発生形態であるものの同じ部材の側壁に発生しており、両者は全く無関係ではなく、表面変状の発生状況の特徴から内部変状の診断に繋がる情報が得られるのではないかと考えられる。

そこで本文では、コンクリート開水路に特徴的な表面変状を有する側壁を対象に、まず表面変状の特徴を分析した上で、採取したコアから内部変状の発生状況を確認し、その上で表面変状から内部変状の発生箇所を目視調査により定性的に診断するための手法を明らかにする。次に、非破壊検査による開水路側壁の内部変状を診断するための手法を明らかにするために、表面走査法による超音波試験に対して考察を加える。



(a) 最多頻度水位の上部のひび割れ (表面変状) (b) 側壁内部の層状ひび割れ (内部変状)

写真-1 開水路に特徴的な表面変状と内部変状

## 2. 目視調査による内部変状の診断手法

### 2.1 対象構造物の概要および表面変状の発生状況

本文で対象にした凍害が発生している開水路は、北海道にある1974(昭和49)年頃に築造された背面が土中に埋もれている現場打ちコンクリート開水路である。側壁(高さ2m, 幅約8m, 部材厚さ0.20m)の全景を写真-2に示す。

この側壁には、開水路に特徴的な表面変状が発生している。まず、最多頻度水位の上部である気中部だけに表面ひび割れが発生し、下部である水中部には表面ひび割れが見られない。次に、目地付近の気中部には、凍結期の凍結融解作用だけでなく、非凍結期における気温の変化に応じた側壁の体積変化が目地(止水板)で拘束されることで発生する応力によるひび割れが斜めに立ち上がる形で発生している。

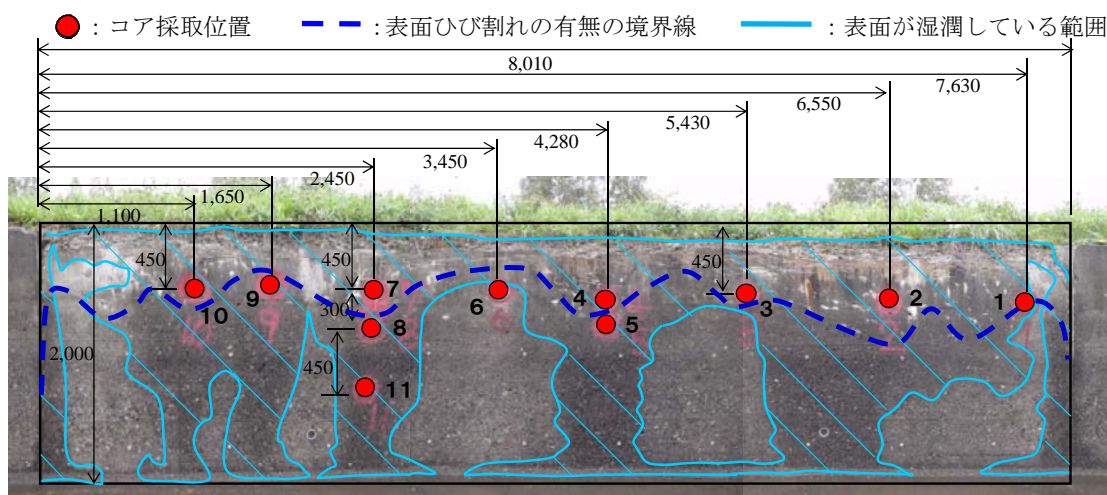
側壁の気中部に見られる表面ひび割れは、数多くあり、その発生方向は規則性がなく、ひび割れ長さもばらばらである。表面ひび割れの有無の境界は、写真中に示すように、最多頻度水位の位置に沿うように高さ方向に平行

\*1 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)

\*2 (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

\*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 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)



単位：mm

写真-2 調査対象側壁の全景および調査箇所の概要

ではなく、凹凸の起伏を持って発生している。表面ひび割れが下に凸の箇所の天端は、特にスケーリングが著しいため、降雨や融雪水が他よりも多く流れ込む箇所であることが示唆される。また、表面ひび割れには、エフロレンスが発生しており、側壁内部から表面に向けて水の移動があることがわかる。

一方、現地調査の日によっては、側壁表面の状況（写真-2の上段および中断）に違いが見られ、降雨の数日後には、上段に示すように全面ではなく部分的に湿潤している箇所が見られる。この側壁表面における湿潤箇所については、後に考察する。

## 2.2 内部変状の発生状況

対象とした側壁からは、JIS A 1107-2002 に準拠して計11本のコアを採取した。コアビットの径は75mmであり、

採取したコアの直径は69mm、長さは部材厚さと同じ200mmである。コアを採取する目的は、表面変状の特徴から内部変状を診断するための目視調査の手法を検討することであることから、コアの採取位置は、凹凸の起伏を有する表面ひび割れの形態を考慮に入れて決定した（表-1を参照）。写真-2の下段にコア採取位置を示す。

採取したコアの状況を写真-3に示し、表-1に結果を整理して示す。

コア2, 3, 4, 6, 7, 9, 10は、ほぼ同じ高さの気中部の位置から採取したものであるが、表面ひび割れの形態としては、コア2, 3, 4, 7, 10が下に凸、コア6, 9が上に凸と異なる。コアの状況からは、下に凸の箇所では確実に複数の層状ひび割れが発生していることがわかる。一方、上に凸の箇所ではコア6に層状ひび割れの発生が確



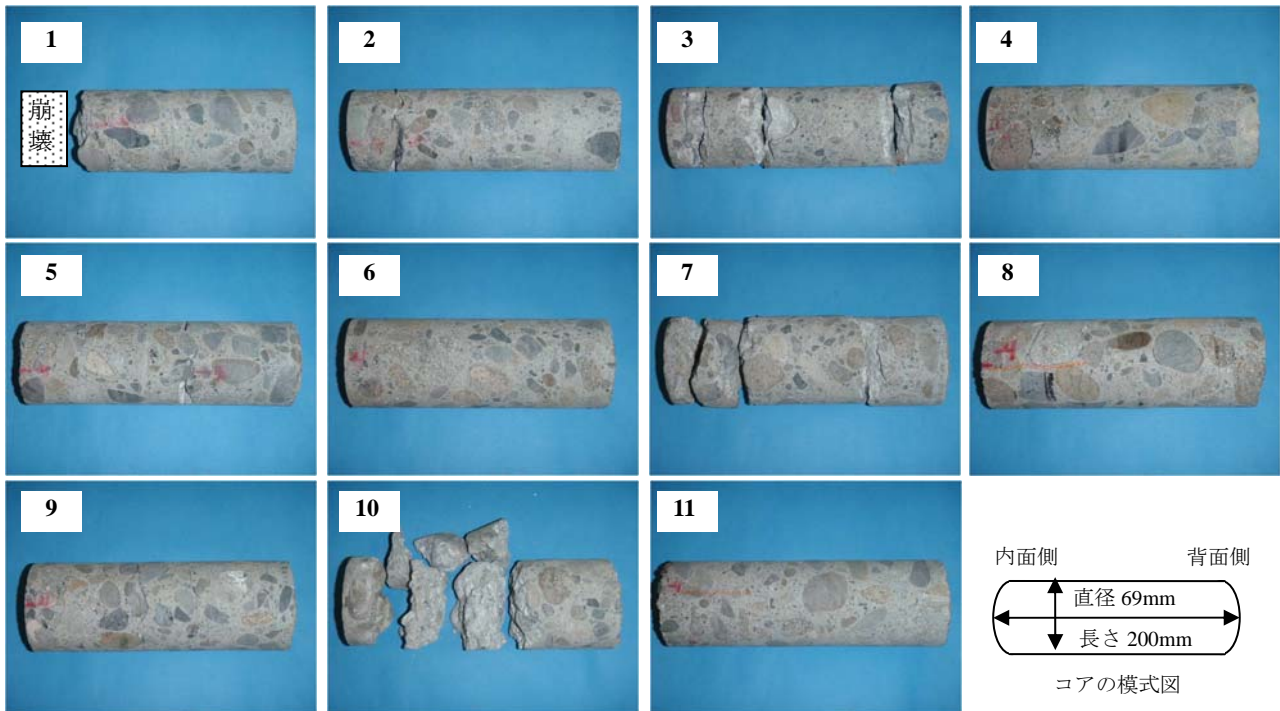


写真-3 コアの状況

表-1 コアの採取位置および状況

位置	コア採取位置における表面ひび割れの状況	コアの一体性	コアの状況
1	目地付近の斜めひび割れ	×	内面側から3cmまでは崩壊, 他は所々に微細ひび割れ有り
2	下に凸 (表面ひび割れ少)	×	内面側から2~3cmに層状ひび割れ, 他は所々に微細ひび割れ有り
3	下に凸	×	内面側から1.5cm, 3cm, 7cm, 17cmに層状ひび割れ有り
4	下に凸 (表面ひび割れ少)	○	内面側から5cmに層状ひび割れ有り, 他は骨材に微細ひび割れ有り
5	下に凸 (4の30cm下部)	×	内面側から5~7cm, 13cm, 19cmに層状ひび割れ有り
6	上に凸	○	内面側から5cmに層状ひび割れ有り, 他はひび割れ無し
7	下に凸	×	内面側から2cm, 5cm, 15cmに層状ひび割れ有り, 15cmの位置で一部崩壊
8	下に凸 (7の30cm下部)	○	全体的に骨材およびその周囲に微細ひび割れ有り
9	上に凸	○	微細な層状ひび割れ有り, 全体的に微細ひび割れ有り
10	下に凸 (表面ひび割れ少)	×	内面側から2cmまでと背面側から7cmまで以外は崩壊 (3つの層状ひび割れの発生可能性有り)
11	ひび割れ無し (7の75cm下部)	○	ひび割れ無し

認できるもののコアの一体性は確保されており, 下に凸の箇所よりも軽度の内部変状であると見なされる。コア9では層状ひび割れが発生していない。これらのことから, 表面ひび割れが上に凸の箇所では内部変状である層状ひび割れが発生している可能性が低く, 下に凸の箇所では高くなるのがわかる。

目地付近から採取したコア1は, 内面側から3cmまで崩壊している。上記したように目地付近では, 側壁の体積変化による応力が繰り返し作用することから, コンクリート組織のゆるみが著しかったことがわかる。

コア5および8は, 表面ひび割れの形態が下に凸になる箇所の直下の水中部から採取したものである。コア5を採取した位置の表面にはひび割れが発生していないも

の, 内部には複数の層状ひび割れの存在が確認され, 層状ひび割れの発生位置が内面側から5cmと同じであることから, コア4とコア5の層状ひび割れは連続している可能性が示唆される。また, コア7の直下にあるコア8は, 全体的に骨材およびその周囲に微細ひび割れが発生しているものの, 層状ひび割れは発生していないことから, コア7の層状ひび割れはコア8まで伸びておらず, その途中で止まっていることが示唆される。コア11には, 目視できる限りのひび割れを確認することができない。コア11は, コア7と8の直下であり, 両者のコアの状況からも, 側壁の上部である気中部に発生している内部変状の層状ひび割れは, 下部の水中部に向かうに従って徐々に軽度になるのがわかる。

## 2.3 目視調査による層状ひび割れの診断手法

今回対象にした開水路側壁の表面ひび割れは、高さ方向に平行ではなく凹凸の起伏を持って発生している。且つ、表面ひび割れの形態が下に凸の箇所はスケーリングが著しく、また、降雨の数日後には下に凸の箇所から下部が特に湿潤している。目視調査により確認できるこれらの事項と採取コアにおける層状ひび割れの発生状況を関係付けて考察するならば、スケーリングの発生状況から融雪水などが地形的に流れ込みやすいと判断できる箇所では、コンクリート内部の飽水度が高くなり、側壁内部の温度変化が面的に起こっているとしても、その箇所が凍結時に膨張することで凍害が他の箇所に比べて進行していることが考察できる。そして、これらを原因として凍害が進行している箇所では、コンクリート組織のゆるみや微細ひび割れが生じているために、更に水が供給されやすく凍結時の膨張圧力に追従してひび割れが拡大しやすくなるために、凹凸の形態をもって表面ひび割れが発生すると考えられる。特に凍害によりコンクリート内部にひび割れや空隙が生じている場合は、透水性が大きくなり側壁内部の水は重力にしたがって下に移動することから、表面ひび割れの形態が下に凸のところ、層状ひび割れが発生している可能性が高くなり、その箇所は部分的な湿潤状態として表れると考察できる。

以上のことを整理すると、開水路側壁の内部変状である層状ひび割れは、次の条件が複数揃う箇所に発生している可能性が高い。

- 側壁の天端に他よりも著しいスケーリングが発生している箇所
- 表面ひび割れの形態が下に凸の箇所
- 降雨の数日後に表面が湿潤している箇所

目視調査による層状ひび割れの発生箇所の定性的診断は、これらの条件が複数揃う箇所を踏査により見つけることで行うことができると考えられる。

一方、表面ひび割れは、内部の凍結時の膨張圧力に追従して拡大するものと考えられることから<sup>2)</sup>、表面ひび割れが他よりも多く発生している箇所では、凍結時の膨張圧力が内部の層状ひび割れの発生や拡大に使われず、表面ひび割れの拡大に使われるため、層状ひび割れが発生あるいは他の箇所よりも拡大している可能性は低い。今回の採取コアの結果だけで断言できるものではないが、層状ひび割れが発生している可能性が高い箇所は、上記の条件に「表面のひび割れ密度が他よりも小さい箇所」も加えることができると考えられる。

## 3. 超音波試験による内部変状の診断手法

### 3.1 表面走査法の概要

寒冷地において凍害の進行が懸念されるコンクリート

構造物では、凍害劣化深さとして表される表面からの劣化深さの推定が行われる。非破壊で表面劣化深さを推定する方法には表面走査法による超音波試験があり、その適用方法は遠藤らにより報告されている<sup>3)</sup>。この表面走査法によるコンクリートの表面劣化深さ推定方法は、柏により日本に紹介<sup>4)</sup>され、オリジナルは1974年に制定されたBS4408 Part 5に記載されている方法<sup>5)</sup>である。

BS4408 Part5に記載されている表面走査法による表面劣化深さ推定式は、式(1)に示すものである。

$$t = \frac{x_0}{2} \sqrt{\frac{V_s - V_d}{V_s + V_d}} \quad (1)$$

$t$ : 劣化部の厚さ (mm),  $V_d$ : 劣化部の超音波伝播速度 (劣化部の探子間距離と超音波伝播時間の直線の勾配の逆数) (km/s),  $V_s$ : 健全部の超音波伝播速度 (健全部の探子間距離と超音波伝播時間の直線の勾配の逆数) (km/s),  $x_0$ : 直線の傾向が変わる位置 (mm)

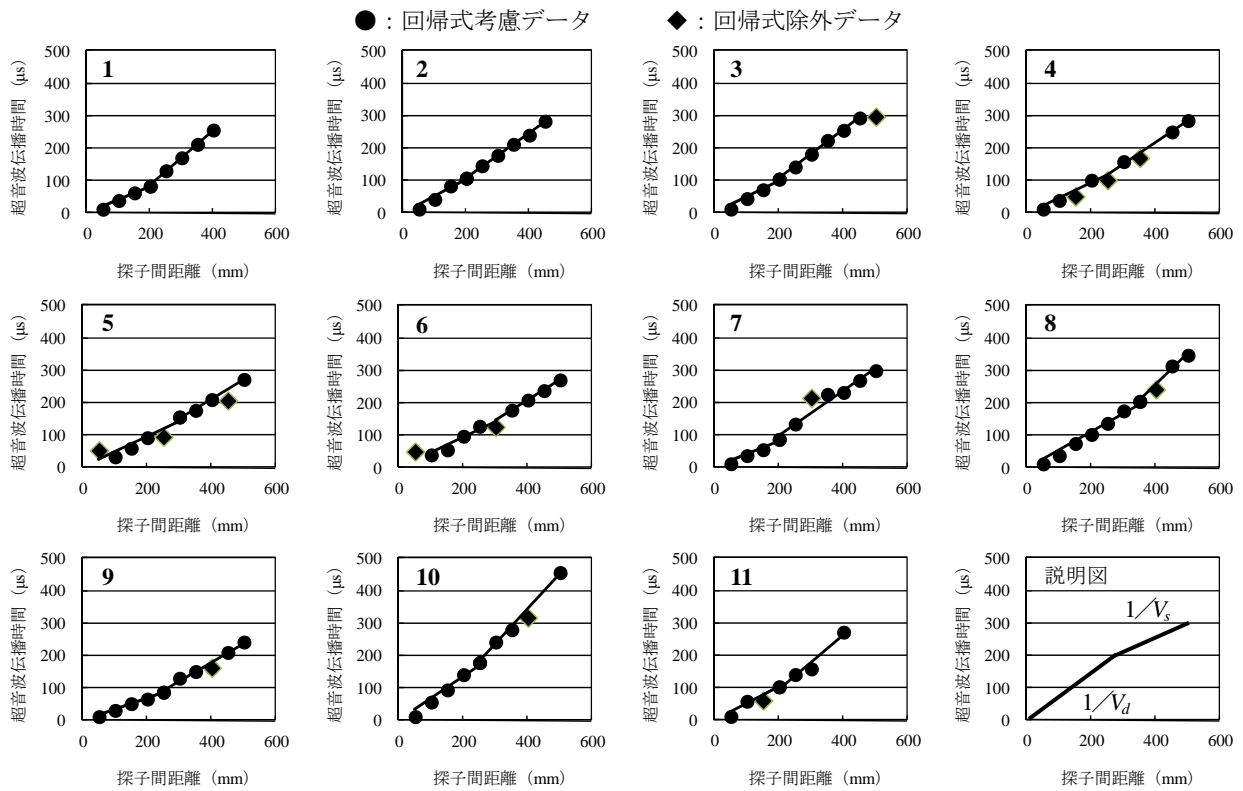
表面走査法による超音波試験は、周波数 54kHz の P 波用振動子 (直径 50mm) の測定器を用いて、発振子と受振子の端子間距離を同一高さで 50~500mm まで 50mm 間隔で 10 段階にかえて実施した。コンクリートの超音波伝播速度は、コンクリートの含水率の影響を受ける<sup>6)</sup>が、本研究では測定箇所の表面含水率は測定しておらず、測定表面の乾湿状態を目視で確認し、著しい濡れがないことを確認した上で測定を行っている。

### 3.2 コア採取位置における表面走査法の結果

写真-2に示すコア採取位置において表面走査法を適用した結果を図-1に示す。また、それぞれの位置における探子間距離と超音波伝播時間の関係から求めた  $V_d$  と  $V_s$  を表-2に示す。

式(1)は、表面に劣化部がある場合のその深さを表面走査法の結果を用いて求めるものであり、 $V_s > V_d$  の関係が成立することが条件になる。しかし、コア採取位置における伝播速度は全ての位置において  $V_s < V_d$  であり、この側壁には表面部よりも内部に劣化部が存在し、表面劣化深さを推定することができないという結果になる。

前述したように、この側壁には、内部変状である層状ひび割れが発生しており、表面部と内部がひび割れにより完全ではないが層状に割れている状態にある(写真-4を参照)。このような層状ひび割れが発生している箇所では、表面走査法による超音波の透過が層状ひび割れにより阻害され、測定される端子間距離に対して実際の伝播距離が増す(端子間距離 < 伝播距離)のために、 $V_s < V_d$  になるのではないかと考えられる。目視で層状ひび割れの発生が確認されない箇所においても、壁状部材である側壁の構造形式の特徴から、日射熱が面的に作用して側壁内部に伝導することで凍結融解作用による劣化が層状



図一 コア採取位置における表面走査法の探子間距離と超音波伝播時間の関係

表一 コア採取位置における表面走査法の伝播速度

位置	$V_d$ (km/s)	$V_s$ (km/s)
1	2.447	1.173
2	1.927	1.466
3	2.035	1.324
4	2.111	1.502
5	2.088	1.693
6	2.112	1.620
7	2.483	1.447
8	1.794	1.034
9	2.938	1.713
10	1.470	0.909
11	1.928	1.200



写真一 側壁表面部の層状ひび割れ

中部、右岸側側壁の気中部および水中部には確認することができない。一方、コアから観察できる内部変状は、右岸側気中部においてひび割れは確認できないものの、左岸側側壁の気中部と水中部において層状ひび割れが確認できる。

この開水路側壁の各位置において表面走査法を適用した結果を図一および表一に示す。層状ひび割れが発生している左岸側気中部および水中部では  $V_s < V_d$  になるのに対して、右岸側気中部および水中部では  $V_s > V_d$  になり表面劣化深さを推定することができる。その推定値は、右岸側気中部 32.0mm、水中部 22.4mm である。

以上のことから、紙面の都合上2つの開水路側壁における結果ではあるが、壁状部材の構造形式の特徴に基づいて層状ひび割れが発生している側壁では、表面走査法の結果が  $V_s < V_d$  になることから表面劣化深さを推定することはできない。しかし、逆に考えるならば、 $V_s < V_d$  になる箇所には層状ひび割れが発生している可能性

になることや、表層部で生じる炭酸化によるセメントペーストの緻密化が超音波伝播速度に影響を及ぼすこと<sup>7)</sup>等で、 $V_s < V_d$  になるのではないかと考えられる。

### 3.3 異なる開水路側壁における表面走査法の結果

開水路側壁における表面走査法の結果の特異性を明らかにするために、異なる開水路側壁で実施した表面走査法の結果を示す。

この開水路は、北海道にある1965(昭和40)年頃に築造された背面が土中に埋もれているもので、側壁は現場打ちL型ブロックである。左岸側および右岸側における側壁の表面変状と各位置で採取したコアの状態を写真一5に示す。表面ひび割れは、左岸側側壁の最多頻度水位よりも上部の気中部だけに確認でき、左岸側側壁の水

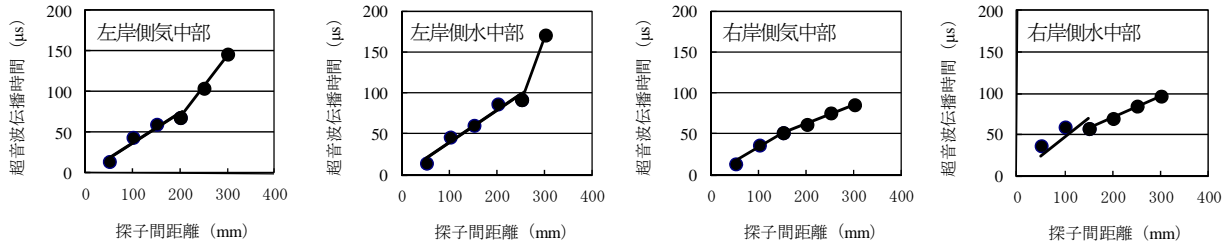


図-2 異なる開水路側壁における表面走査法の探子間距離と超音波伝播時間の関係

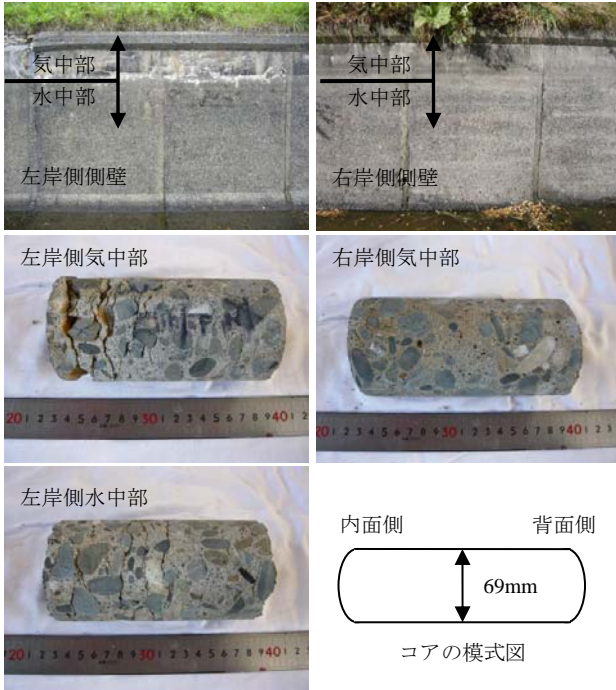


写真-5 異なる開水路側壁の表面変状とコアの状態

が高いことが認められるため、表面走査法で求められる  $V_d$  と  $V_s$  の傾向から内部変状である層状ひび割れの定性的な診断を行える可能性があると言える。

#### 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) 表面ひび割れが凹凸の起伏を持って発生している開水路側壁では、表面ひび割れの形態が下に凸の箇所でも内部変状である層状ひび割れが発生している可能性が高い。
- (2) 目視調査による層状ひび割れの発生箇所の定性的診断は、側壁の天端に他よりも著しいスケリングが発生している箇所、表面ひび割れの形態が下に凸の箇所、降雨の数日後に表面が湿潤している箇所、が複数揃う箇所を踏査により見つけることを行うことができる。

表-3 異なる開水路側壁における表面走査法の伝播速度

位置	表面変状	内部変状	$V_d$ (km/s)	$V_s$ (km/s)
左岸側気中部	有	有	2.682	1.282
左岸側水中部	無	有	2.514	0.635
右岸側気中部	無	無	2.907	4.299
右岸側水中部	無	無	2.138	3.762

- (3) 開水路側壁における層状ひび割れの表面走査法による診断は、 $V_d$  と  $V_s$  の傾向 ( $V_s < V_d$ ) から定性的に行える可能性がある。

#### 参考文献

- 1) 緒方英彦, 鈴木哲也, 山崎大輔, 濱 幸雄: 壁状構造物であるコンクリート製開水路の側壁内部の凍害劣化, コンクリート工学年次論文集 Vol. 32, pp.833-838, 2010
- 2) 田畑雅幸, 洪悦郎, 鎌田英治: コンクリートの凍害におけるひび割れの役割の考察, 日本建築学会構造系論文集 366, pp.11-17, 1986
- 3) 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融解抵抗性の評価方法に関する委員会報告書・論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.293-298, 2008
- 4) 柏忠二: コンクリートの非破壊試験法, 技報堂, pp.41-42, 1981
- 5) BS4408: Recommendations for Non-Destructive Methods of Test for Concrete, Part 5 Measurement of the Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete, E3 Estimating the thickness of a layer of inferior quality concrete, British Standards Institution, 1974
- 6) 日本非破壊検査協会: 新コンクリートの非破壊試験, 技報堂, pp.63-64, 2010
- 7) 周藤将司, 森田匡隆, 緒方英彦, 山崎大輔: コンクリート表面の炭酸化が非破壊試験結果に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集 Vol. 33, pp.1679-1684, 2011