

論文 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

緒方 英彦^{*1}・鈴木 哲也^{*2}・山崎 大輔^{*3}・濱 幸雄^{*4}

要旨：コンクリート製開水路に生じる凍害の発生形態は、開水路に特徴的な構造形式、供用される環境条件に応じた特徴があり、劣化が進行した段階では表面変状としてのひび割れで凍害の発生を確認することができる。しかし、内部変状については、その発生形態が明らかにされていない。本研究では、実際に凍害が発生している開水路の側壁から採取したコアを分析することで、側壁内部におけるひび割れの発生形態を明らかにし、圧縮強度、元素分布、細孔径分布、中性化深さから凍害による側壁の内部変状を考察した。

キーワード：壁状構造物、開水路、凍害、表面変状、内部変状、層状ひび割れ、微細ひび割れ

1. はじめに

寒冷地におけるコンクリート構造物の診断では、劣化現象の一つである凍害の的確な評価が求められる。また、凍害が発生している構造物の補修対策では、凍害を引き起こす因子の除去もしくは抑制を確実に行うことが求められる。ただし、コンクリート構造物の凍害は、構造形式、供用される環境条件に応じた特徴があり、その特徴に応じた診断と対策を行わなければならない。

農業水利施設の多くの割合を占めるコンクリート製開水路（以下、開水路）は、一方向の長さが他の二方向に比べて非常に小さい部材である側壁および底板で構成され、構造形式としては壁状構造物の特徴を有する。また、供用環境は、1年のうちにおいて灌漑期と非灌漑期に大別され、灌漑期においても開水路の内面の状態は、水位以下の部分は流水中にあり、水位以上の部分は空气中に曝されるといふ部材位置によって供用中の環境条件が異なる特徴を有する。開水路の背面の状態も、土中に埋もれている場合、空气中に曝されている場合に大別され、土中に埋もれている場合は、更に地下水位の高低により供用中の環境条件が異なることになる。開水路における凍害の発生形態は、このような構造形式や供用中の環境条件に応じた特徴があり、劣化が進行した段階では、**写真-1**に示すような表面変状としてのひび割れで凍害の発生を確認することができる¹⁾²⁾。

しかし、供用中の環境条件によっては、長い供用期間の中でコケや微粒子などで構造物の表面が覆われ表面変状が確認できない場合があり、加えて劣化進行過程によっては表面変状が外観できず内部変状だけが起きている場合がある。開水路における凍害診断を確実に行うためには、表面変状の発生形態を把握するだけでなく、内部変状の発生形態も把握しておかなければならない



(a) 長手方向ひび割れ（側壁の背面側）



(b) 最多頻度水位の上部のひび割れ

写真-1 開水路の凍害劣化ひび割れ

が、内部変状の発生形態は明らかにされていない。

本文では、実際に凍害が発生している開水路の側壁からコアを採取し、コアを分析することで得られる情報に基づいて、開水路の側壁内部におけるひび割れの発生形態を明らかにし、圧縮強度、元素分布、細孔径分布、中性化深さから凍害による側壁の内部変状を考察した。

2. 開水路の概要および凍害による表面変状

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ある。現地調査を実施した2008

*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 日本大学 生物資源科学部生物環境工学科専任講師 博士（工学）（正会員）

*3 ショーボンド建設株式会社 補修工学研究所研究員（正会員）

*4 室蘭工業大学 工学研究科くらし環境系領域教授 博士（工学）（正会員）



写真-2 開水路の状況

(平成 20) 年非灌漑期および 2009 (平成 21) 年灌漑期における全体の状況と左岸側壁および右岸側壁の状況を写真-2 に示す。左・右岸側壁の写真には、灌漑期において最多頻度水位の上部になる気中部、下部になる水中部の位置を示している。左岸は山側になり内面は西に面し背面の地下水位は高く、右岸は谷側になり内面は東に面し背面の地下水位は低いという地形上の特徴がある。ここで、現地の環境は、年最低気温が 2008 年において-20.6℃、2009 年において-14.2℃である³⁾。

本開水路における凍害の発生は、左岸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、左岸側壁の水中部、右岸側壁の気中部および水中部には、凍害による表面変状を確認することができない。左岸側壁の気中部に見られる表面変状としてのひび割れは、開水路の長手方向に伸びる形態を示している。最多頻度水位よりも上部の気中部だけに表面変状としての凍害ひび割れが発生するのは、非凍結期である灌漑期の供用環境が影響して乾湿繰返しを受ける気中部の耐凍害性が水中部よりも劣るためだと既往の研究²⁾では考えられている。また、右岸側壁に凍害による表面変状が見られないのは、左岸側壁内面に日射があたり、日射があたらない右岸側壁内面では凍結は起こるが融解が起こりにくく、凍害の発生原因となる凍結融解作用の頻度が少ないためである。

3. 凍害による内部変状

3.1 コアの採取および分析方法

コアは、左・右岸側壁の内面側から内径 7.5cm のコア

ビットにより採取した。コアの採取位置は、左岸側壁の同じバレル内における気中部と水中部、右岸側壁の気中部の 3 位置であり、各位置からはそれぞれ 3 本のコアを採取した。

採取したコアは、全形の状況を目視で観察するとともに、EPMA (Electron Probe Micro Analyzer) による反射電子像およびマイクロスコープによる画像解析から側壁内部のひび割れの発生形態を分析した。また、凍害が発生している側壁コンクリートの状態を考察するために、圧縮強度、EPMA による元素分布、水銀ポロシメーターによる細孔径分布、フェノールフタレイン法による中性化深さを測定した。

3.2 側壁内部のひび割れ

各位置から採取したそれぞれ 3 本のコアは、ひび割れの発生状態がほぼ同じであり、各位置で採取した中の代表的なコアの状況について写真-3 には全形を、写真-4 には内面側付近の反射電子像を示す。

本開水路に見られる表面変状は、左岸側壁の気中部における長手方向のひび割れだけである。しかし、コアからは、左岸側壁の気中部と水中部において、側壁の部材厚の方向に層状のひび割れが発生していることが確認できる。左岸側壁の気中部においては、表面と内部のひび割れの発生方向が異なり、開水路の側壁においては表面と内部でひび割れの発生形態が異なることがわかる。また、左岸側壁の水中部においては、内部だけに凍害ひび割れが発生しており、外観上の目視調査だけでは凍害による劣化が確認できないことがわかる。一方、右岸側

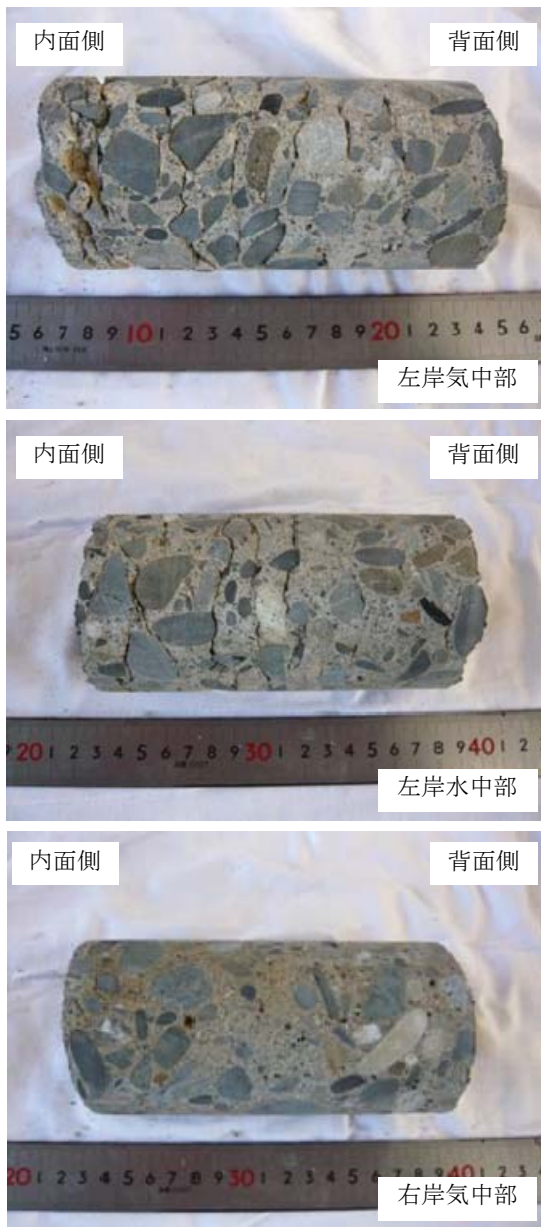


写真-3 側壁から採取したコアの状況

壁の気中部においては、連続した大きなひび割れが見られず、モルタル部に不連続な微細ひび割れが観察されるだけである。

反射電子像の画像解析から求めた各層状ひび割れの間の距離を表-1に示し、層状ひび割れの幅およびモルタル部に生じている不連続な微細ひび割れの幅を内面側付近と背面側付近に分けて表-2に示す。ここで、層状ひび割れについては、コア採取時に拡大したと見なされるひび割れを除いており、表中に示す値は、各位置とも1本のコアの測定値である。

左岸側壁の気中部と水中部に見られる各層状ひび割れの間の距離は、粗骨材の影響が無視できず、側壁の中央に位置するひび割れに比べて内面側は小さく、背面側は大きくなる傾向があるものの、概ね等間隔であること

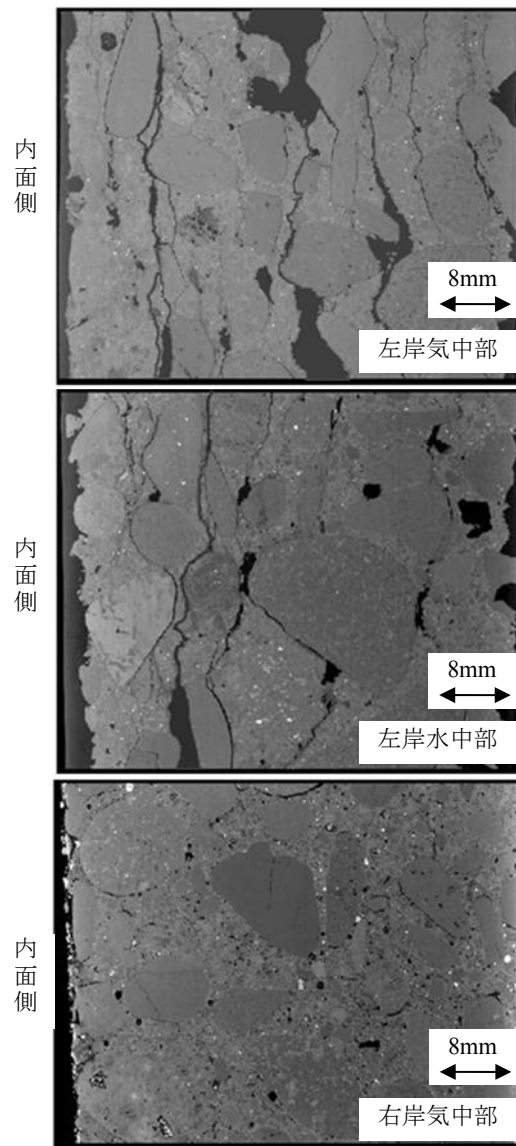


写真-4 コアの反射電子像

表-1 層状ひび割れの発生位置

層	ひび割れ間の距離 (cm)	
	左岸気中部	左岸水中部
1	1.4	0.5
2	2.6	1.7
3	1.1	1.1
4	1.2	1.6
5	1.9	2.2
6	1.4	5.9
7	2.8	—

※第1層は内面からの距離、最終層は背面までの距離

がわかる。また、層状ひび割れの幅は、内面側と背面側で大差はなく、気中部と水中部でも大差がない。気中部と水中部で発生している層状ひび割れは、両者のコアを同じバレル内から採取していることから、気中部と水中部で連続していることが推察できる。

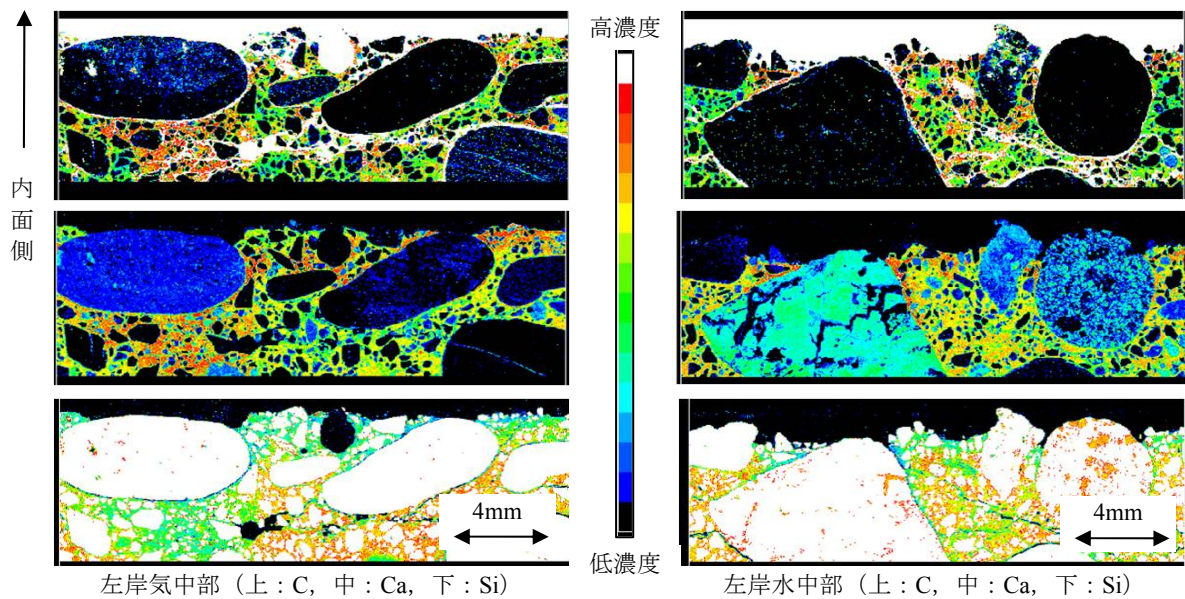


図-1 左岸側壁の内面側付近における元素分布

表-2 側壁内部のひび割れ幅

コア位置		層状ひび割れの幅 (μm)	微細ひび割れの幅 (μm)
左岸 気中部	内面側	110~160	2~40
	背面側	95~190	20~60
左岸 水中部	内面側	60~115	3~13
	背面側	60~170	20~75
右岸 気中部	内面側	無	3~35
	背面側	無	4~35

表-3 圧縮強度

コア位置	圧縮強度 (N/mm ²)
左岸気中部	4.2-7.1 (5.7)
左岸水中部	7.9-14.9 (11.4)
右岸気中部	27.6-38.2 (35.9)

※括弧内は平均値

表-4 中性化深さ (mm)

左岸気中部		左岸水中部		右岸気中部	
内面側	背面側	内面側	背面側	内面側	背面側
2.6	0.8	0.9	2.5	2.9	0.9

※各6点の平均値

右岸側壁の気中部は、表面変状が見られず、外観からは凍害による劣化を確認することはできないが、左岸側壁と同程度の微細ひび割れが発生している。左岸側壁および右岸側壁における供用中の環境条件の違いについては上記したとおりであるが、両側壁は劣化進行過程が異なるだけであり、右岸側壁においても内部的には凍害による劣化が発生していると言える。

3.3 側壁内部のコンクリートの状態評価

左岸気中部および水中部、右岸気中部の位置におけるそれぞれ2本のコアを用いて測定した圧縮強度は、表-3に示すとおりである。左岸気中部および水中部には、層状ひび割れが発生していることから、あくまでも参考資料として結果を捉えなければならないが、右岸側壁に比べて左岸側壁の圧縮強度は小さく、左岸側壁の力学的性能は著しく低下していることがわかる。

EPMAで測定した左岸側壁の気中部および水中部における内面側付近の元素分布を図-1に示す。ここで、コアの表面は、樹脂で含浸成形しているために、表面においてCが高濃度、CaおよびSiが低濃度となっている。

気中部と水中部における供用中の環境条件は、凍結期である非灌漑期において両者とも空気中に曝されてお

り同様に凍結融解作用を受けるが、非凍結期である灌漑期において気中部は空気中に曝され、水中部は流水中にあるために異なる。このために、気中部と水中部における内面側付近の元素分布には違いが見られると思われたが、実際には大きな違いが見られなかった。ただし、CとCaの高濃度領域がほぼ一致しているのが認められ、特にこの傾向は気中部において強いことが認められた。このCとCaの関係からは、気中部が水中部に比べて中性化が進行していることが示唆され、フェノールフタレイン法により測定された中性化深さは、表-4に示すとおりである。中性化深さは、内面側において気中部が水中部よりも大きくなっており、EPMAの考察で得られたように、中性化は水中部よりも気中部で進行していることが確認できた。左岸側壁の水中部において、背面側の中性化深さが内面側よりも大きくなっている原因は、現時点において不明である。

水銀ポロシメーターで測定した左岸気中部および水

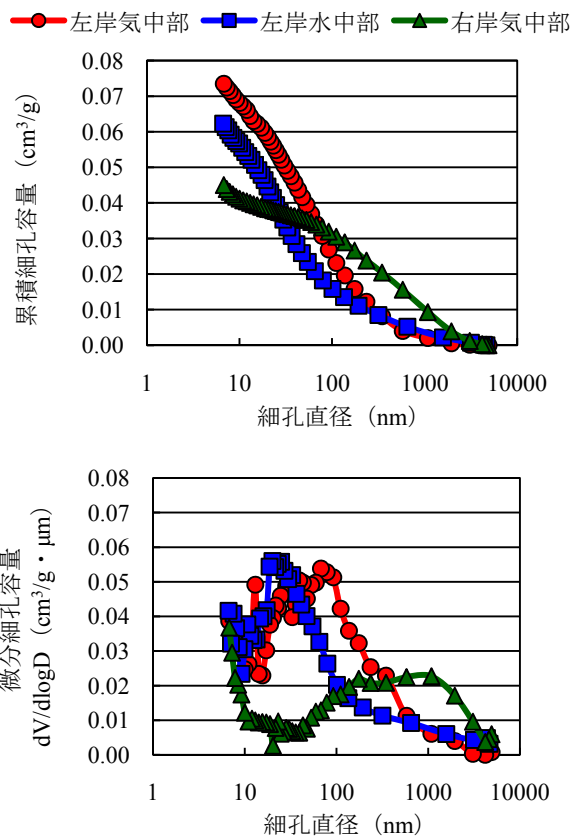


図-2 コアの細孔径分布
(上：累積細孔容量，下：微分細孔容量)

中部、右岸気中部におけるコアの平均的な細孔径分布の結果を図-2に示す。細孔径分布の測定に用いた試料は、圧縮強度試験後のものであることから、本来の細孔径分布とは異なることが推察される。そこで、ここでは、結果を相互比較するだけに止める。

細孔容量は、10~100nmにおいて左岸気中部と左岸水中部が右岸気中部よりも多いのに対して100nm以上では右岸気中部の方が多い。一方、総細孔容量は、左岸気中部が0.074cm³/g、左岸水中部が0.062cm³/g、右岸気中部が0.045cm³/gであり、凍害により内部に層状ひび割れが発生している左岸側壁が右岸側壁に比べて多い。このことから、左岸側壁の気中部と水中部において表面的な凍害の発生状況は異なるが、側壁内部の細孔径分布はほぼ同じであることがわかる。

ここまで得られた結果を総合的に考察すると、表面変状の観点からは、左岸気中部に凍害による劣化が発生しており左岸水中部には発生していない評価になる。しかし、内部変状の観点からは、左岸側壁の気中部と水中部の両者とも凍害による劣化が同様に進行しているという評価が得られる。つまり、左岸気中部の表面は、乾燥収縮ひび割れを含む側壁コンクリートの体積変化により生じる微細ひび割れが内部コンクリートの凍結時の膨張圧で拡大し⁴⁾、更にエフロレッセンスが表れるこ

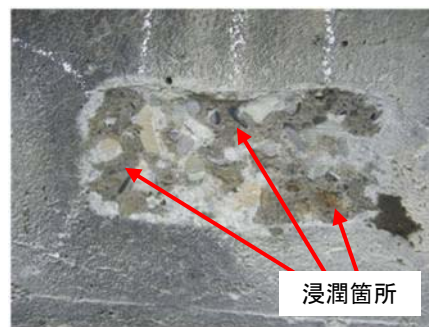


写真-5 表面研磨後の内部からの浸潤

とで表面変状が外観できる状態にあるだけであり、左岸水中部の表面は、灌漑期において流水中にあるために微細ひび割れが微粒子などで閉じてしまい、加えて流水による表層部のモルタル分の損耗も起きているために表面変状が外観できない状態にあるものと考察される。

また、著者らの既往の研究²⁾では、凍結融解試験B法の結果として、気中部を想定して凍結融解試験の途中で乾湿繰返し養生を行った場合は、水中部を想定して水中養生を行った場合よりも耐凍害性が劣ることが確認されているが、本開水路のように層状ひび割れが発生するまで凍害劣化が進行した段階では、気中部と水中部の両者とも最終的に同様な劣化状態に至ると推察される。

4. 側壁内部の層状ひび割れ

4.1 層状ひび割れの発生メカニズム

本開水路の左岸側壁に層状ひび割れが発生するメカニズムとしては、次のように考えられる。

開水路において凍結期は非灌漑期にあたり、気中部、水中部によらず側壁内面の全面が空气中に曝されて凍結融解作用を受ける。コンクリートを凍結融解させる外気温は、側壁において面的に作用して内部に伝導することから、その結果として部材厚の方向に温度差が生じ凍結時の膨張圧も部材厚の方向に生じることで層状のひび割れが発生したものと推察される。側壁内部における層状ひび割れの発生が左岸側壁に限られたのは、日射があたりにくい右岸側壁では左岸側壁に比べて側壁内部の温度変化が小さく凍結融解作用の頻度が少なくなったためだと考えられる。また、飽水度の高いコンクリートは凍結時の膨張圧が大きくなることから、背面から地下水が供給されコンクリート内部の飽水度が高まる左岸側壁の供用環境も影響を及ぼしていると考えられる。左岸側壁の内部が湿潤していることは、気中部をグラインダーで研磨し、研磨面に内部から水分が浸潤してくる状況を撮影した写真-5から確認することができる。

4.2 層状ひび割れが発生する可能性

開水路の凍害による内部変状を考察する上で、今回得られた層状ひび割れが特異なものでないことを明らか



写真－6 別の開水路における凍害の発生状況

にしておかなければならない。

写真－6は、北海道の別の開水路で撮影した凍害の発生状況である。最多頻度水位よりも上部の気中部で採取したコアの状況もあわせて示す。この開水路は、1974(昭和49)年頃に築造され、写真－2に示した開水路と同様に背面が土中に埋もれており、表面変状としての凍害ひび割れが発生している側壁は山側に位置して背面における地下水位が高い。

写真－2と写真－6の開水路は異なる水路であることから、コンクリートの材料特性および凍結融解作用の頻度に係わる気象条件などが異なるために、両者における凍害の劣化進行の程度は同じではない。しかし、コアからは、側壁の内面側付近に層状の形態でひび割れが発生していることを確認することができ、側壁内部に発生する層状ひび割れは特異なものではないことがわかる。ただし、層状の形態で側壁内部に凍害ひび割れが発生する開水路は、供用環境として背面が土中に埋もれており、且つ背面の地下水位が高い場合という条件が现阶段では付けられる。この層状ひび割れが発生する特定の供用環境については、今後更に精査しなければならない。

5. まとめ

本研究で得られた結果は、以下のようにまとめられる。

- (1) 背面が土中に埋もれており、且つ背面の地下水位が高い供用環境にある側壁内部には、側壁の部材厚の方向に層状のひび割れが発生している。この層状ひび割れは、灌漑期において最多頻度水位の上部になる気中部と下部になる水中部で同様に発生する。
- (2) 気中部に凍害による表面変状および内部変状が発生している側壁では、水中部に表面変状が見られないとしても内部変状は同様に発生している。
- (3) 凍害が発生している側壁の内面側付近のコンクリートは、気中部と水中部において元素分布に大きな違いは見られないが、中性化は水中部よりも気中部の方が進行している。
- (4) 一方の側壁に凍害による表面変状および内部変状が発生している開水路では、他方の側壁においても内部に同様な微細ひび割れが発生しており、劣化進行過程は異なるものの凍害による劣化は発生している。

本研究では、実際に凍害が発生している開水路の側壁から採取したコアを分析することで、開水路の側壁内部における凍害劣化を検討した。採取できたコアの数は限られているために、本研究で得られた結果の信頼性が十分に確保されているとは言えない。ただし、凍害による開水路側壁の内部変状の特徴は明らかにできたと思われる。本研究で得られた結果の信頼性は、今後データ数を増やすことで確保していきたい。

謝辞

本文を取り纏めるにあたり鳥取大学の服部九二雄教授、松江工業高等専門学校の高田龍一教授、高知大学の佐藤周之准教授、寒地土木研究所の小野寺康浩氏、北海道北方建築総合研究所の桂修氏にはご助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 緒方英彦, 高田龍一, 野中資博, 服部九二雄: RC開水路の凍害, 農業農村工学会誌, 76(9), pp.31-34, 2008
- 2) 緒方英彦, 高田龍一, 服部九二雄: コンクリート製開水路の非凍結期の供用環境が凍害に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, 31(1), pp. 1159-1164, 2009
- 3) 気象庁気象統計情報: <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etm/index.php>
- 4) 日本コンクリート工学協会: コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会報告集, pp.84-87, 2008