

論文 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

緒方 英彦*1・高田 龍一*2・服部 九二雄*3

要旨：コンクリート製開水路に生じる凍害は、最多頻度水位の上部に顕著に発生するものの、下部には発生しにくいという特徴がある。最多頻度水位は、非凍結期の灌漑期における通水高さにあたり、凍結期に発生する凍害が非凍結期の供用環境に影響を受けていることを推察することができる。本研究では、室内試験でこの現象を確認することを目的として、凍結融解試験の途中の供試体を乾湿繰り返しおよび水中浸漬することで、非凍結期の供用環境が凍害に及ぼす影響を検討した。

キーワード：開水路, 凍害, 凍結期, 非凍結期, 灌漑期, 非灌漑期, 乾湿繰り返し

1. はじめに

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、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でも、特徴的な凍害が生じる。コンクリート製開水路における凍害の発生位置は、図-1に示すように側壁背面および地下水の状況、灌漑期における水位、日射を受ける位置に応じた特徴があり¹⁾、特に写真-1に示すように灌漑期の通水高さにあたる最多頻度水位の上部（以下、気中部）に顕著に発生するものの、下部（以下、水中部）には発生しにくいという特徴がある²⁾。開水路が凍結融解の繰り返しを受ける凍結期は、非灌漑期にあたり、管理用水の通水状況にもよるが、気中部、水中部に係わらず空气中に曝されていることから、両者とも同様な凍結融解の繰り返しを受けているはずである。それにも関わらず最多頻度水位を境にして凍害の発生状況が異なるのは、灌漑期、つまりは非凍結期の供用環境が影響を及ぼしていることを推

察することができる。また、屋外に暴露されているコンクリート製開水路では、非灌漑期の凍結期、灌漑期の非凍結期が供用年数の経過とともに繰り返されることで、最多頻度水位の上部に位置する気中部と下部に位置する

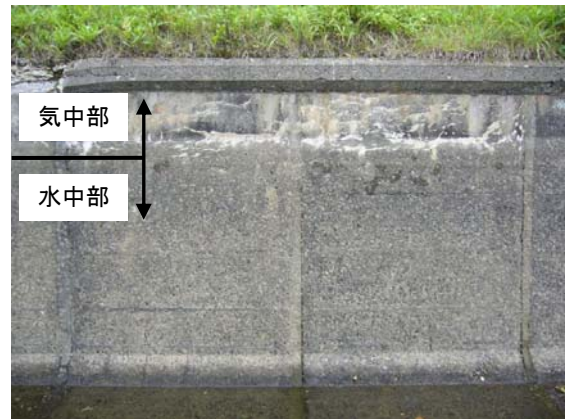


写真-1 コンクリート製開水路の側壁の凍害

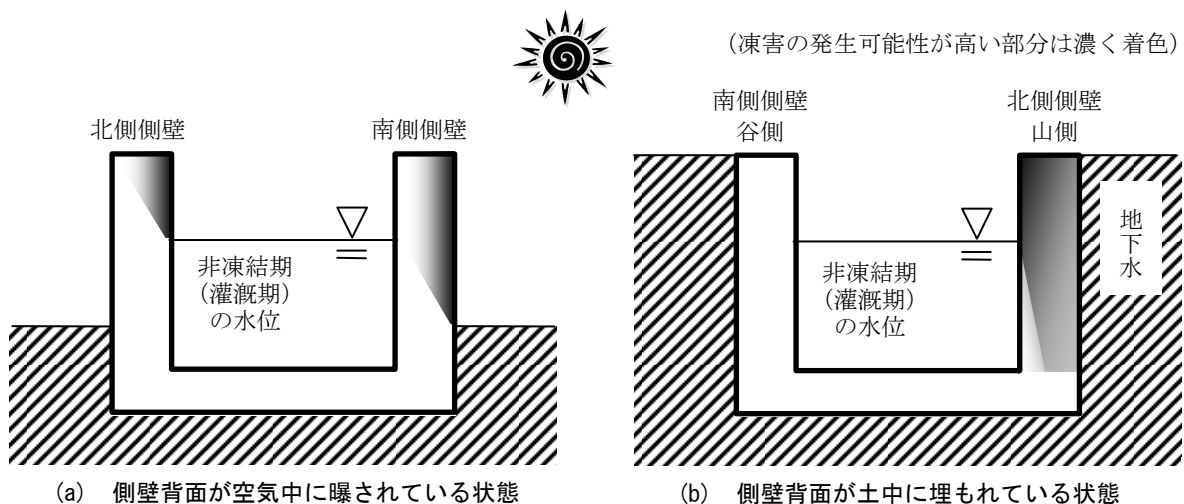


図-1 コンクリート製開水路における凍害発生位置の概略図¹⁾

*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 松江工業高等専門学校 環境・建設工学科教授 農学博士 (正会員)

*3 鳥取大学 農学部生物資源環境学科教授 農学博士 (正会員)

表－1 コンクリートの示方配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤 (g/m ³)
20	8	55	6	40.2	165	300	710	1,058	2,700

混和剤：ポリカルボン酸エーテル系高性能 AE 減水剤（レオビルド SP8N）

表－2 材料の物性値

材料	密度(g/cm ³)	吸水率(%)	含水率(%)	有効吸水率(%)	F.M.
セメント（普通ポルトランドセメント）	3.15	—	—	—	—
細骨材（鳥取市産陸砂）	2.59	1.59	1.00	0.53	1.83
粗骨材（鳥取県産砕石）	2.59	1.62	0.51	1.01	6.68

水中部の耐凍害性に差が生じているのではないかと推察される。

本研究では、凍害の発生特徴に応じた診断方法および評価方法、補修工法を確立するための基礎研究として、コンクリート製開水路に特徴的なこの凍害の現象を確認することを目的とした凍結融解試験を実施した。凍結融解試験は、A 法（水中凍結水中融解試験）および B 法（気中凍結水中融解試験）であり、試験途中の供試体を槽内から取り出し、恒温器並びに恒温水槽を用いての乾湿繰り返しおよび水中浸漬を所定の期間行うことで、非凍結期の供用環境が凍害に及ぼす影響を検討した。ここで、本研究においては、非凍結期の供用環境が凍害に及ぼす影響を検討することを第一の目的として、供試体は耐凍害性の確保を前提とした配合条件（水セメント比 55%、空気量 6%）による AE コンクリートで作製し、試験開始材齢は材齢 28 日としている。

2. 凍結融解試験の概要

2.1 供試体

現在供用中のコンクリート製開水路は、戦後の食料増産期に建造されたものから近年建造されたものまで建造年代に幅があり、そのためにコンクリートも AE 剤などの混和剤を用いておらず水セメント比が大きいものから、近年の AE コンクリートのように耐凍害性を確保するために水セメント比や空気量が調整されたものまで様々である。また、凍害が生じる側壁は、一方向の厚さが他の二方向に比べて非常に小さい長手部材であり、現場打ちとして鉛直下向きに打設されたものもあれば二次製品のものもある。本研究の凍結融解試験に用いる供試体は、これらコンクリート製開水路の特徴を考慮して作製する必要があるが、今回は非凍結期の供用環境が凍害に及ぼす影響を検討することを第一の目的として、耐凍害性の確保を前提とした配合条件（水セメント比 55%、空気量

6%）による AE コンクリートで作製した。本研究で使用するコンクリートの示方配合を表－1に、材料の物性値を表－2に示す。

凍結融解試験に用いるコンクリート供試体は、10×10×40cmの角柱供試体であり、10×40cmの面から打設し、バイブレーターで締め固めを行うことで作製した。脱型は打設の翌日であり、脱型後の養生については次節に説明する。また、コンクリートの基本的物性を測定するための円柱供試体（直径 10×高さ 20cm）も作製した。円柱供試体は、打設の翌日に脱型した後、所定の材齢まで水温 20℃の恒温水槽内で標準水中養生を行った。

2.2 試験条件

凍結融解試験は、JIS A 1148 に準じた A 法（水中凍結水中融解試験方法）および B 法（気中凍結水中融解試験）で行った。試験開始材齢は、材齢 28 日である。

脱型から凍結融解試験開始までの供試体の養生および凍結融解試験の条件を表－3に示す。乾湿繰り返しの条件は、屋外暴露に近い条件として米田ら³⁾が提案している水中浸漬 6 時間、乾燥 40℃42 時間を 1 サイクルとして 7 サイクルを設定した。A 法では試験槽内の供試体設置数の関係から Case 1～Case 3 を実施し、B 法では Case 1～Case 4 を実施した。供試体数は、各試験ケースとも 3 本である。

通常行われる凍結融解試験は、凍結融解 300 サイクルまでであるが、本研究では試験途中に乾湿繰り返しおよび水中浸漬を行う期間を 3 回設けており、各回の間の測定値の変化を複数回の測定から検討できるような試験条件としているために、410 サイクルまで試験を実施した。

2.3 測定項目

凍結融解試験に供したコンクリート供試体は、20 あるいは 30 サイクル毎に寸法、気中質量、水中質量、超音波伝播速度、たわみ振動の一次共鳴振動数を測定した。各項目の測定は、プラスチックブラシで供試体表面をブラ

表-3 凍結融解試験前の養生および凍結融解試験の条件

試験ケース	凍結融解試験前の養生	凍結融解試験の条件	備考
Case 1	水温 20℃の恒温水槽内で標準水中養生。	凍結融解試験の途中に供試体を槽内から取り出し、水温 20℃の恒温水槽内で水中浸漬を 378 時間。その後再び凍結融解試験。水中浸漬は 50, 170, 290 サイクルの測定後に実施。計 3 回。	非凍結期（灌漑期）の水中部を想定
Case 2	脱型直後から乾湿（水温 20℃の恒温水槽内で水中浸漬 6 時間、温度 40℃の恒温器内で乾燥 48 時間）を 7 回繰り返し（計 378 時間）。その後試験開始材齢 28 日までは水温 20℃の恒温水槽内で標準水中養生。	試験開始から終了まで、凍結融解試験を連続して実施。	凍結融解試験前の乾湿繰り返し
Case 3	水温 20℃の恒温水槽内で標準水中養生。	凍結融解試験の途中に供試体を槽内から取り出し、乾湿（水温 20℃の恒温水槽内で水中浸漬 6 時間、温度 40℃の恒温器内で乾燥 48 時間）を 7 回繰り返し（計 378 時間）。その後再び凍結融解試験。乾湿繰り返しは 50, 170, 290 サイクルの測定後に実施。計 3 回。	非凍結期（灌漑期）の気中部を想定
Case 4	水温 20℃の恒温水槽内で標準水中養生。	試験開始から終了まで、凍結融解試験を連続して実施。	通常の凍結融解試験

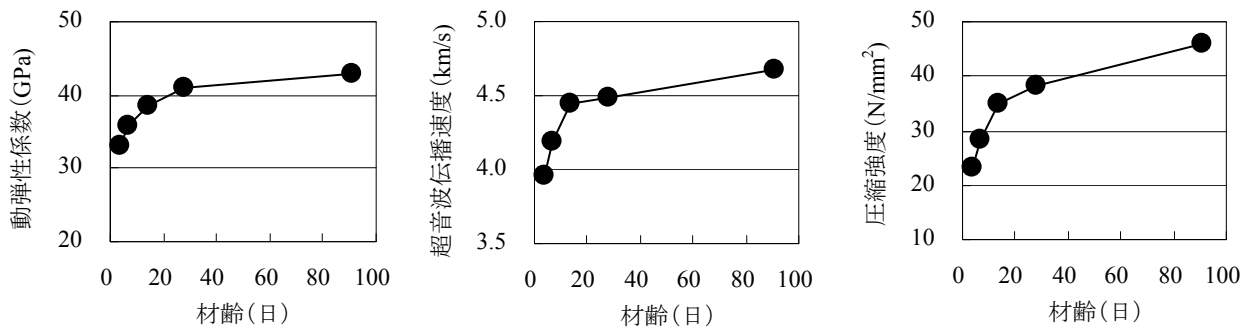


図-2 凍結融解試験に用いたコンクリートの基本的物性

ッシングしたうえで行った。一次共鳴振動数は JIS A 1127 に準じて測定し、超音波伝播速度は周波数 50kHz の P 波用振動子（直径 40mm）を使用した二探触子法で測定した。超音波伝播速度の測定は、供試体の長さ方向の端部にグリスを用いて発・受振子を密着し直接法で行った。

測定した一次共鳴振動数および超音波伝播速度からは、以下の式により相対動弾性係数を求めた⁴⁾。

$$P_n = \frac{f_n^2}{f_0^2} \times 100 \quad (1)$$

$$P_n = \frac{E_{dn}}{E_{d0}} \times 100 \quad (2)$$

$$E_d = 4.0387V^2 - 14.438V + 20.708 \quad (3)$$

P_n : 凍結融解 n サイクルの相対動弾性係数(%), f_n : 凍結融解 n サイクルにおけるたわみ振動の一次共鳴振動数

(Hz), f_0 : 凍結融解 0 サイクルにおけるたわみ振動の一次共鳴振動数(Hz), E_{dn} : 凍結融解 n サイクルにおける動弾性係数(GPa), E_{d0} : 凍結融解 0 サイクルにおける動弾性係数(GPa), E_d : コンクリートの動弾性係数(GPa), V : コンクリートの超音波伝播速度(km/s)

コンクリートの基本的物性を測定するための円柱供試体では、材齢 3, 7, 14, 28, 91 日に縦振動の一次共鳴振動数による動弾性係数、超音波伝播速度、圧縮強度の測定を行った。供試体数は、各材齢とも 3 本である。

3. 結果および考察

3.1 コンクリートの基本的物性

円柱供試体から求めたコンクリートの基本的物性は、図-2のとおりである。各材齢とも供試体 3 本の平均値である。凍結融解試験開始材齢 28 日における各値は、動弾性係数 41.1GPa, 超音波伝播速度 4.49km/s, 圧縮強度 38.2N/mm² であり、一般のコンクリート製開水路の設計

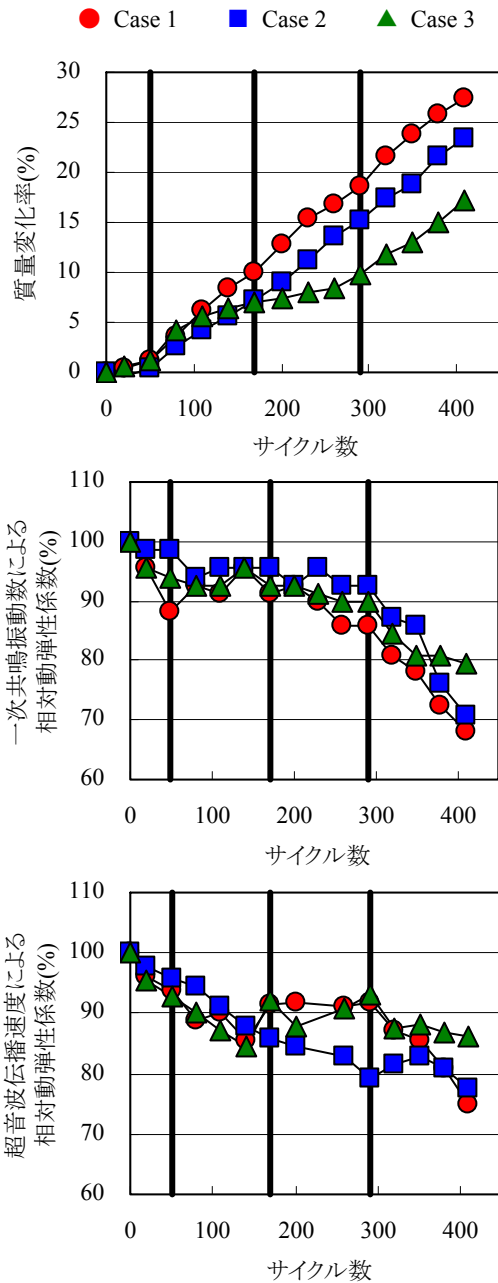


図-3 A法による凍結融解試験の結果

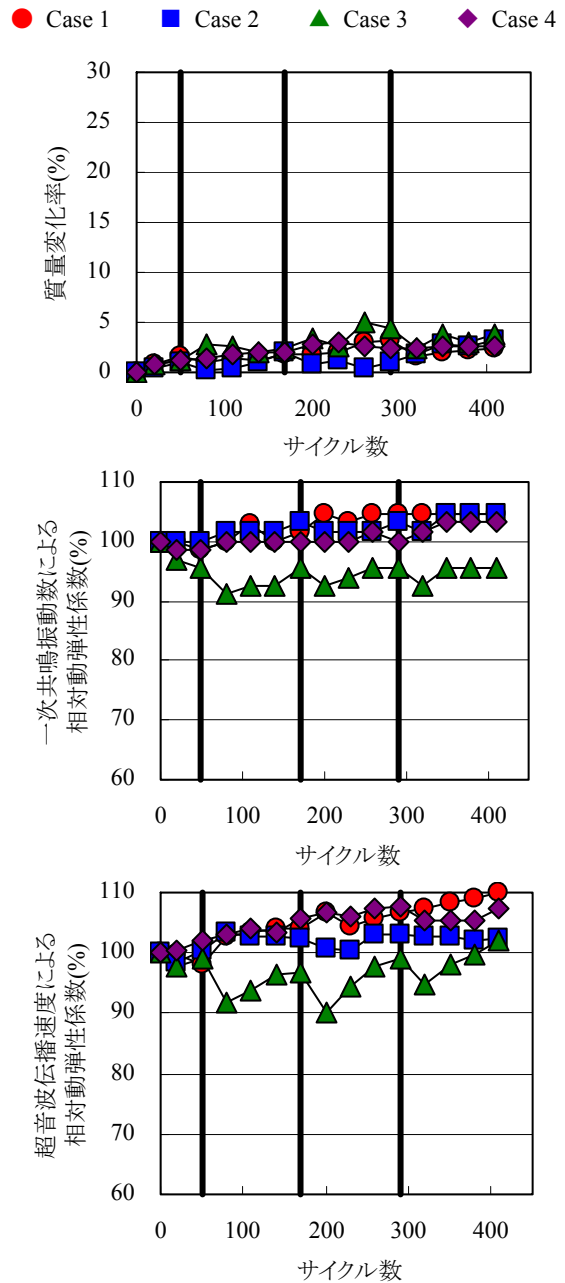


図-4 B法による凍結融解試験の結果

基準強度が 21N/mm^2 であることを踏まえると、強度特性としては十分であることがわかる。また、スランプは 11cm 、空気量は 6.6% であった。

3.2 凍結融解試験

A法の凍結融解試験の結果を図-3に、B法の結果を図-4に示す。図中に記入の縦線は、Case 1とCase 3における乾湿繰り返しおよび水中浸漬を実施したサイクル数(50, 170, 290サイクル)を示している。乾湿繰り返しおよび水中浸漬は、このサイクル数での各項目の測定を行った後に実施している。

A法の質量変化率は、凍結融解サイクルの進行とともに大きくなり、 $\text{Case 3} < \text{Case 2} < \text{Case 1}$ の傾向はあるもの

の、いずれの試験ケースにおいてもスケーリングが著しいことがわかる。Case 3の質量減少率が他よりも小さくなった理由としては、試験途中の乾湿繰り返しが水中浸漬、乾燥の順番であったために、再び凍結融解試験に供した際のコンクリート内部の飽水度が他よりも小さく、スケーリングを引き起こすための凍結による膨張圧が小さくなったためであると考えられる。

コンクリート内部の劣化を評価する指標である相対動弾性係数からは、試験前並びに試験途中の乾湿繰り返しおよび水中浸漬の影響を明確に見ることができない。これは、スケーリングが著しく進行したために、乾湿繰り返しの影響を顕著に受けるコンクリート表面が失われ

たためであると考えられる。実際のコンクリート製開水路における凍害の発生状況からは、コンクリート表面のスケーリングがあまり見られないことから、A法による凍結融解試験は、コンクリート製開水路の凍害を検討する上では苛酷な試験条件であると言える。

一方、B法については、いずれの試験ケースにおいても質量変化率は僅かであり、A法で見られるようなスケーリングは起こっていない。相対動弾性係数においては、Case 1, Case 2, Case 4 が緩やかな増加をしながらほぼ同じ値を示すのに対して、Case 3 だけが異なる値を示しており、その傾向も試験途中に乾湿繰り返しを行った後に低下し、次の乾湿繰り返しを行うまで徐々に増加する傾向を示す。乾湿繰り返しを行うことによる相対動弾性係数の低下は、一次共鳴振動数による相対動弾性係数において、50-80 サイクルが 4.4%、170-200 サイクルが 2.9%、290-320 サイクルが 2.9% である。

青野らは、硬化セメントペーストの耐凍害性が乾湿繰り返しまたは乾燥によって低下する原因として、空隙構造が粗大化するとともに、硬化セメントペースト中の C-S-H のシリケートアニオン鎖が乾燥により脱水縮重合するためであることを明らかにしている⁵⁾。本研究における Case 3 の相対動弾性係数の低下も、これらが原因となって起こっているものと推察される。また、乾湿繰り返し後に再び凍結融解試験を行ったときの相対動弾性係数の増加については、他の試験ケースでも凍結融解サイクルの進行とともに緩やかながらも同様に増加していることから、Case 3 だけに特異な現象であるとは言い切れない。本研究における凍結融解試験の開始材齢は 28 日であり、図-2 からそれ以降の材齢における物性値の増加が認められることから、水中融解の過程でのセメントの水和の影響ではないかと思われる。

凍結融解試験の途中に水中浸漬を行った Case 1 には相対動弾性係数の低下が見られず、乾湿繰り返しを行った Case 3 に低下が見られたことから、非凍結期に気中部となる最多頻度水位の上部と水中部となる下部では、耐凍害性に差が生じることを本研究により確認することができ、供用年数の経過とともに凍結期と非凍結期が繰り返されることで更に両者の間に差が生じる可能性があることが示唆される。特に、本研究で用いたコンクリート供試体が耐凍害性の確保を前提とした配合条件による AE コンクリートであることから、AE 剤などの混和剤を用いておらず水セメント比が大きいコンクリートで建造された開水路では、気中部と水中部の耐凍害性により大きな差が生じ、その結果として気中部だけに凍害が顕著に生じると推察される。

3.3 超音波伝播速度による相対動弾性係数の評価

図-3 と図-4 には、一次共鳴振動数による相対動弾

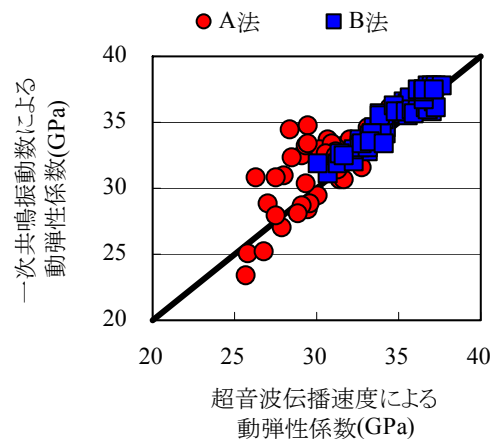


図-5 超音波伝播速度による動弾性係数の推定

性係数に加えて超音波伝播速度による相対動弾性係数も示している。超音波伝播速度による相対動弾性係数を示した理由は、実際のコンクリート構造物で定量的な凍害診断を行う際、一次共鳴振動数を測定することは現実的に難しく、一次共鳴振動数に代わるもので相対動弾性係数を評価する必要があり、超音波伝播速度が一次共鳴振動数に代わるものとして試行されているからである²⁴⁾⁶⁾。超音波伝播速度の利用性が様々な形で確認できれば、室内試験と現地試験で測定した相対動弾性係数の比較検討を行うことが可能になる。

本研究で測定した一次共鳴振動数および超音波伝播速度による動弾性係数の関係を図-5 に示す。図では、式(3)で算定される超音波伝播速度による動弾性係数を横軸に、JIS A 1127 に基づく一次共鳴振動数による動弾性係数を縦軸にとっている。

超音波伝播速度による動弾性係数と一次共鳴振動数による動弾性係数の間には、A法においてB法よりも大きなばらつきが生じているものの、全般的によく一致していることがわかる。ここで、両者の差の平均絶対偏差は、A法が 1.5GPa、B法が 0.5GPa であり、このばらつきの程度の違いが図-3 と図-4 における一次共鳴振動数と超音波伝播速度による相対動弾性係数の違いとなって表れていることがわかる。A法においてばらつきが大きくなった原因は、スケーリングによるコンクリート表面の荒れにあると考えられ、超音波探子が荒れた表面に十分に密着していなかったためであると考えられる。実際のコンクリート製開水路で超音波伝播速度を測定する際には、この超音波探子の密着に留意することで、超音波伝播速度による動弾性係数を求めることができ、室内試験の結果と比較検討を行うことが可能であると言える。

4. まとめ

本研究により得られた結果をまとめると次のように

なる。

- (1) 本研究で作製したコンクリート供試体においては、A法による凍結融解試験でスケーリングが著しく生じたために、試験前並びに試験途中の乾湿繰り返しおよび水中浸漬の影響を明確に確認することができない。A法による凍結融解試験は、コンクリート製開水路の凍害を検討する上では苛酷な試験条件であると言える。
- (2) B法による凍結融解試験においては、試験途中に水中浸漬を行ったケースで相対動弾性係数の低下が見られないものの、試験途中に乾湿繰り返しを行ったケースで相対動弾性係数の低下が見られた。
- (3) 非凍結期に気中部となる最多頻度水位の上部と水中中部となる下部では、耐凍害性に差が生じ、コンクリート製開水路の凍害が非凍結期である灌漑期の供用環境の影響を受けていることが確認できた。供用年数の経過とともに凍結期と非凍結期が繰り返されることで、気中部の耐凍害性は徐々に低下し、その結果として気中部だけに凍害が顕著に生じると推察される。

本研究では、コンクリート製開水路に特徴的な凍害の現象を AE コンクリートで作製した供試体の凍結融解試験から検討し、その現象の一端を確認することができた。しかし、実際のコンクリート製開水路に生じている凍害の現象を確認するためには、non-AE コンクリートや水セメント比が大きいコンクリートで作製した供試体、開水路側壁の施工方法を考慮して鉛直打設により作製した供試体、長期材齢の供試体、あるいは気中凍結水中融解試験だけでなく、気中凍結気中融解試験による検討などが必要であることを最後に付記しておく。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金基盤研究(B)「農業水利施

設のストックマネジメントのための予防保全対策に関する研究」(課題番号 18380143, 研究代表者:長東勇)の中で行ったものである。本研究の実施には、森田匡隆さん、柳川絢さん(鳥取大学農学部)に多大なる御協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

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, 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, 日本コンクリート工学協会, pp.63-70, 2006
- 3) 米田恭子, 千歩 修, 長谷川拓哉, 相川葉月: 乾湿繰り返しを加えた凍結融解試験による各種コンクリートの耐凍害性, コンクリート工学年次論文, 29(1), pp.1131-1136, 2007
- 4) 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, 24(1), pp.1563-1568, 2002
- 5) 青野義道, 松下文明, 柴田純夫, 濱幸雄: 乾燥および乾湿繰り返しによる硬化セメントペーストの微細構造変化と耐凍害性への影響, コンクリート工学年次論文, 30(1), pp.921-926, 2008
- 6) 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