

論文 機械インピーダンス法を用いたコンクリート開水路の凍害診断手法の検討

久保 元樹*1・井上 真澄*2・佐藤 智*3・石神 暁郎*4

要旨：コンクリート開水路は、部材厚が薄く過湿な環境にあるものが多く、側壁内部に層状のひび割れが発生する場合がある。しかしながら、側壁内部の変状を簡易的に調査する手法がないのが実情である。本論では、コンクリート表面を打撃して圧縮強度を推定する方法である、機械インピーダンス法を用いることで、内部変状の検出が可能であるか検討を行ったものである。測定の結果から、機械インピーダンス値の低下を健全部と相対的に比較することで検出が可能であることが分かった。

キーワード：機械インピーダンス、推定強度、開水路、層状ひび割れ、凍害、診断

1. はじめに

農業水利施設の多くを占めるコンクリート開水路は、橋梁等のコンクリート構造物と比較して部材厚が薄いことに加え、流水および地下水の影響により構成するコンクリート部材が過湿な環境にあるものが多い。このため、コンクリート開水路は、一般的なコンクリート構造物と凍害劣化機構が異なり、部材全体で凍結時の膨張圧が生じることから、表面だけではなく側壁の内部にも凍害劣化(層状ひび割れ)が生じることがあるのが特徴である¹⁾。しかしながら、側壁内部の凍害劣化の有無を簡易的に調査する方法はないのが現状である。開水路は延長の長い構造物であり、機能診断に長期間を要するため、診断時間を短縮できる効率的な機能診断手法の開発が求められている。

コンクリート構造物の非破壊試験方法の一つに、コンクリート表面をハンマで打撃して得られる打撃力波形から機械インピーダンスを求め、圧縮強度を評価する方法(機械インピーダンス法)がある。目的を同じにする従来技術は、反発硬度法である。両手法は、いずれもコンクリート表面を打撃して測定を行う、という類似した測定形態であるが、その基本原理には大きな違いがある²⁾。

反発硬度法では、反発度を計測するが、ハンマ打撃によってコンクリート表面に塑性変形が生じ、その過程においてエネルギーが吸収され反発度が低下することを基本原理としている。これに対し、機械インピーダンス法は、ハンマとコンクリートの接触面でコンクリートの弾性係数に由来する機械インピーダンスを測定し、圧縮強度を推定するという手法を用いている。

測定対象のコンクリートの表層にひび割れが存在する場合、弾性係数が低下すると考えられ、機械インピーダ

ンスによる層状ひび割れの検出が可能と考えられる。本論文は、コンクリート開水路の内部に発生した層状ひび割れの検出が、機械インピーダンス法で可能であるか検討を行ったものである。

2. 機械インピーダンス法の基本原理

機械インピーダンス法は、加速度計が内蔵されたハンマでコンクリート表面を打撃し、その打撃力波形から、打撃対象物の機械インピーダンスを測定するものである。写真-1に機械インピーダンス法の測定状況を示す。



写真-1 機械インピーダンスの測定状況

機械インピーダンス Z は、物体の動きにくさを表したものであり、線形の機械系において、ある1点に加えられた力 F を、その結果生じた速度 V の、力と同じ方向成分で除した値であり、式(1)によって定義される。コンクリートにおいては弾性的性質を示す指標となる。以下に

*1 日東建設株式会社 技術開発部開発課 課長 (正会員)

*2 北見工業大学 工学部 社会環境工学科 准教授 (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 主任研究員 (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 研究員 (正会員)

機械インピーダンス法の基本原理を示す。

$$Z = \frac{F}{V} \quad (1)$$

図-1 にコンクリートを完全弾性体と仮定した時のハンマの衝突モデルを示す。質量 M のハンマが任意の速度 V_0 でバネ係数 K のコンクリートに衝突する場合、ハンマの持つ運動エネルギー E_H は、式(2)に示す通りである。

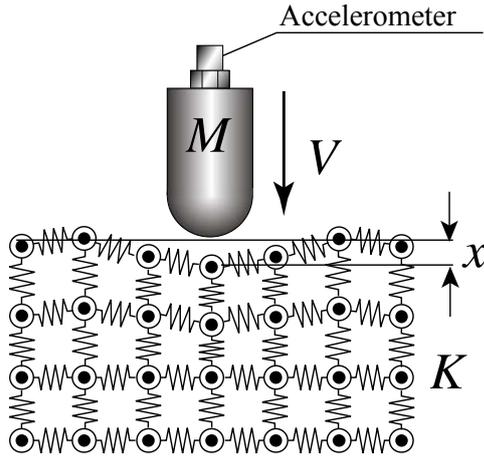


図-1 ハンマの衝突モデル

$$E_H = \frac{1}{2}MV_0^2 \quad (2)$$

一方、ハンマの衝突によって生じるコンクリートのひずみエネルギー E_C は、最大変位量を D_{max} とすると、式(3)に示す通りである。

$$E_C = \frac{1}{2}KD_{max}^2 \quad (3)$$

エネルギーの釣り合いから、両者のエネルギーは等しく、式(4)が成立する。

$$\frac{1}{2}MV_0^2 = \frac{1}{2}KD_{max}^2 \quad (4)$$

ここで最大打撃力 F_{max} は、フックの法則より、式(5)に示す通りであり、式(5)を D_{max} について解き、式(4)に代入して整理すると、式(6)が得られる。

$$F_{max} = KD_{max} \quad (5)$$

$$K = \frac{1}{M} \cdot \left(\frac{F_{max}}{V_0} \right)^2 \quad (6)$$

上記より、機械インピーダンスがコンクリートのバネ係数(いわゆる、弾性係数)、に相当する指標と成り得るこ

とがわかる。また、打撃力の最大値 F_{max} とハンマの打撃速度 V_0 が測定されれば、コンクリート表面の機械インピーダンスの算出が可能である。ただし、平面状弾性体と球面を持つ弾性体の衝突の場合、ヘルツの衝突理論³⁾によって発生する最大打撃力が衝突速度の 1.2 乗に比例するという速度依存性を持つため、式(7)に示すように速度補正を導入している。

$$K = \frac{1}{M} \cdot \left(\frac{F_{max}}{V_0^{1.2}} \right)^2 \quad (7)$$

図-2 にハンマに設置した加速度計で、実際にコンクリートを打撃して得られる波形を示す。直接的に計測するのは、ハンマに働く減速加速度である。この波形から打撃力の最大値および打撃速度の算出は、

$$\left. \begin{aligned} F_{max} &= MA_{max} \\ V_R &= \int_{T_2}^{T_3} A(t) dt \\ V_A &= \int_{T_1}^{T_2} A(t) dt \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

として算出している。ここで、 V_A : ハンマがコンクリートに衝突するときの初速度、 V_R : ハンマがコンクリートから反発するときの初速度、 T_1 : 波形の立上り時刻、 T_2 : 波形が最大となる時刻、 T_3 : 波形の終端時刻、 A : 加速度である。

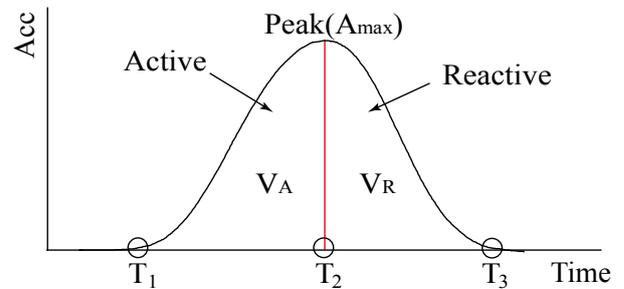


図-2 実際の打撃力波形

実際の計算においては、打撃力が最大となる時刻 T_2 で波形を 2 分割し速度を算出している。時刻 T_2 は、打撃力(加速度)波形が最大値になる時刻であり、またこの時刻ではコンクリート表面の変位が最大となり、ハンマの運動は停止する。つまり、波形の前半部分はハンマがコンクリート表面に変形を与える過程(アクティブ側)で、波形の後半部分はコンクリート内に蓄積された弾性変形エネルギーがハンマの運動エネルギーに変換される過程(リアクティブ側)と言える。

コンクリート表面に脆弱層が存在する場合、アクティブ側では、ハンマ打撃によってコンクリート表面が塑性

変形し、次いで弾性変形する⁴⁾。リアクティブ側では、弾性変形エネルギーのみがハンマのリバウンドに関係する。つまり、塑性変形が生じるとアクティブ側では、コンクリート表面の塑性変形に起因するエネルギーロスの影響が現れると考えられ、これを回避するために式(8)においてリアクティブ側の速度 V_R を用いている。また、ハンマがコンクリートに衝突する時の初速度と、コンクリートがハンマを押し戻しハンマが反発する時の初速度がそれぞれ計算できるため、速度比を計算することで表面の劣化の程度を把握することができる。

3. 実験概要

実験は、北海道空知管内の農業用コンクリート開水路5路線26区間を対象に実施した。表-1に測定路線と測定箇所数の一覧を示す。

表-1 測定路線と測定箇所数一覧

路線番号	延長(m)	供用年数	測定区間数	コアの採取本数
1	34.90	23	3	12
2	999.60	11~50	12	53
3	277.50	45	7	33
4	9.00	13	2	8
5	18.00	27	2	8
合計			26	114

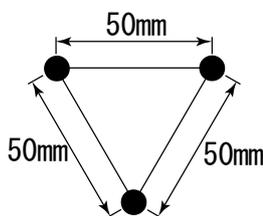
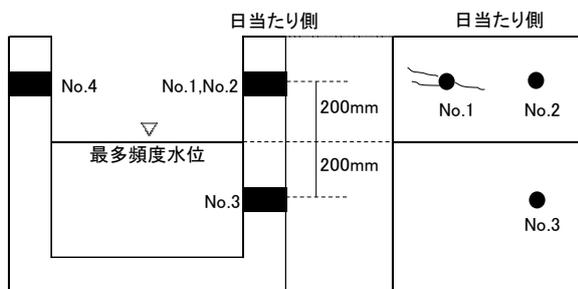


図-3 1区間当たりの測定箇所と測定点配置

農業用コンクリート開水路の多くは水田灌漑のために使用され、北海道においては一般に5月から8月までが灌漑期間である。灌漑期間以外では水路内は空となるため、冬期間に凍結融解作用を受ける環境にある。本論

文では、灌漑期間中に最も多く発生する水位である最多頻度水位より上側を気中部、下側を水中部と称する。各区間における測定箇所の配置は、図-3上に示す通り、日当たり側の側壁で3箇所(気中部2箇所,水中部1箇所)、日影側の側壁で1箇所(気中部)の計4箇所の測定を基本とした。

測定の項目は、機械インピーダンス法と透過弾性波速度(超音波)の2項目とし、透過弾性波速度は、機械インピーダンスの測定を行った箇所の近傍からコア供試体を採取し、コア供試体の長手方向に通過する速度を測定した。コンクリート内部に変状が発生した場合、透過弾性波速度は低下する。本実験では、機械インピーダンスの測定値と対比を行う事を目的に、透過弾性波速度の測定を実施した。なお、機械インピーダンス法の測定は、コア採取位置の近傍について、図-3下に示すように、互いに5cm程度離れた3点について各10回の連続打撃によって測定した。

4. 測定結果

4.1 表面状態の影響

コンクリート開水路は、最多頻度水位の上側(気中部)と下側(水中部)で、表面の状態が著しく異なる。気中部では、日射や雨がかり等の影響により経年劣化が進行すると考えられるが、表面の状態はほぼ平滑である。一方、水中部では、流水の影響により表面のモルタル分が流出・摩耗しており、粗骨材が露出した凹凸を持った表面である場合がほとんどである。

コンクリートの表面を測定する非破壊検査において、表面の凹凸は測定精度に多大な影響を及ぼし、正確なデータの取得が困難となる場合がある。コンクリート内部を評価しようとするには、表面の状態を数値化し、どの程度まで本法の適用が可能であるか検討する必要がある。

図-4は、ハンマがコンクリートから反発するときの初速度に対する、衝突するときの初速度の比(反発係数の逆数)を測定区間ごとに示したものである。No.1, 2, 4は気中部での測定データ、No.3は水中部でのデータである。

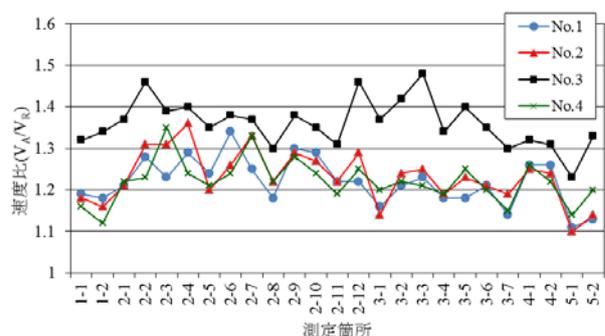


図-4 各測定区間における速度比の推移

図-4 に示す速度比は、反発係数の逆数であるため、表面の状態が悪いほど数値が大きくなる。図からわかる通り、水中部の測定箇所(No.3)のみが、他の測定箇所と比較して明らかに速度比が大きくなっており、表面状態が不良であることが確認できる。

図-5 は、機械インピーダンス法による推定強度を測定区間ごとに示したものである。速度比の結果から、水中部の表面状態が不良であることがわかっているが、推定強度においては、測定箇所間の相違は小さい。機械インピーダンス法は、コンクリートがハンマを押し戻すリアクティブ側の波形を機械インピーダンス計算の対象としており、元々表面状態の影響を受けづらい解析手法を採用していること、また、同一点の連続打撃によって、脆弱層を意図的に押し潰すことで脆弱層の影響を軽減させていることから、水中部においても気中部と同等の精度で測定が可能であったと考えられる。この結果から、以降に示す測定値の変動は、表面状態の影響によるものではなく、内部変状に起因するものと想定される。また、表面状態が悪いコンクリートにおいても、速度比が 1.5 以下であれば、本法の適用が可能であることを示している。なお、図-5 における推定強度は、式(7)のバネ係数値と実際のコンクリートの圧縮強度の関係式から算出した値である。

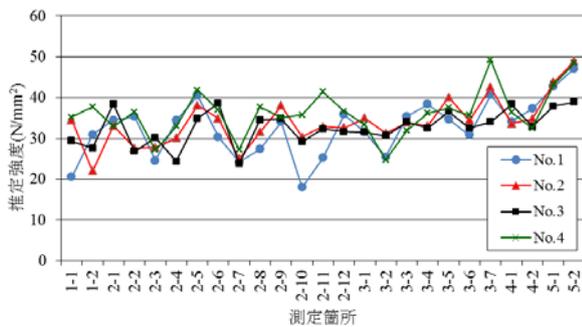


図-5 各測定区間における推定強度の推移

4.2 打撃力波形

図-6 に実際に開水路を打撃して得られた波形の例を示す。図中実線の波形は健全部の打撃力波形、点線の波形は目視検査およびコア供試体の観察結果より内部に層状ひび割れが認められた箇所の打撃力波形である(写真-2 の箇所 A の波形)。健全部と比較して相対的に打撃力の最大値が小さく、打撃力の継続時間が長い傾向があるが、波形そのものの乱れは小さく、左右対称に近いという特徴が見られる。

コンクリート開水路に発生している変状は層状ひび割れ(写真-3)であり、必ずしも表面側から損傷が進行するものではない。つまり、表面側のコンクリートは比較

的健全であるが、部材厚が薄いという状況である。このような場合に機械インピーダンス法によって測定を行うと、ハンマ打撃に対し、表面側のコンクリートが板バネのように挙動し、構造剛性が測定値に反映される。構造剛性は部材厚が薄いほど低くなる。以上より、層状ひび割れの検出に関して、波形後半の機械インピーダンス値が最も変化を捉えやすいものと考えられる。

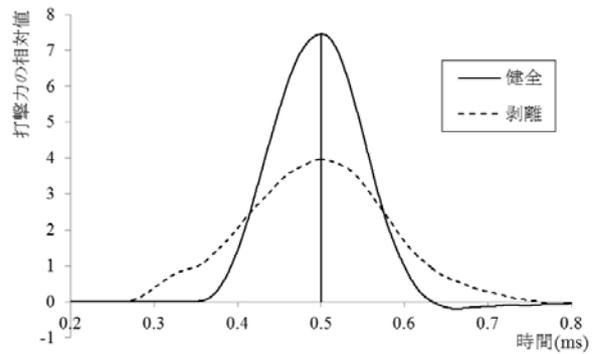


図-6 打撃力波形の例(健全部と剥離部)

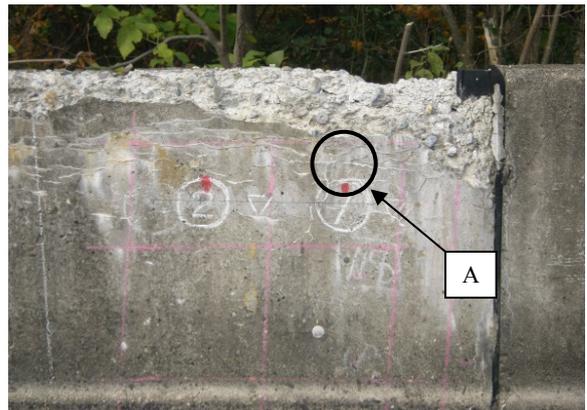


写真-2 凍害劣化の状況

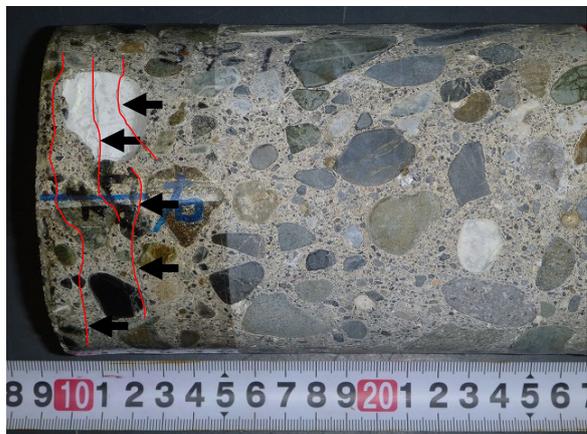


写真-3 側壁内部のひび割れ(層状ひび割れ)の状況(矢印の箇所)

4.3 機械インピーダンスと透過弾性波速度

図-7は、機械インピーダンス値から推定した推定強度と採取コアの長手方向を通過する透過弾性波速度の関係を示したものであり、表-2は図-7のデータの統計値である。

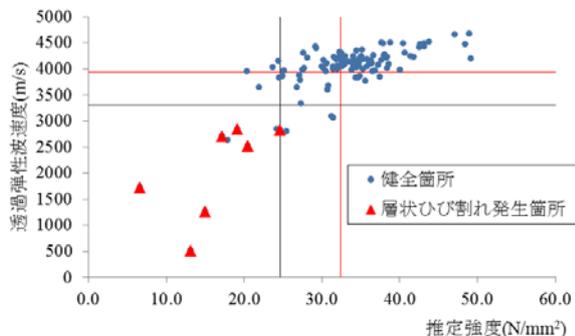


図-7 推定強度と透過弾性波速度の関係

表-2 透過弾性波速度と推定強度の統計値

	平均値 m	標準偏差 σ	m- σ
透過弾性波速度 (m/s)	3938	629	3309
推定強度 (N/mm ²)	32.4	7.8	24.6

図中赤色の三角は、外観の目視検査、並びに採取コアの観察によって層状ひび割れ等の内部変状の発生が確認された点である。透過弾性波速度は、概ね4000m/s前後で推移しているが、目視検査で異常と判定された箇所において極端な速度低下が見られる。この傾向は機械インピーダンス法においても同じく、目視検査で異常と判定された箇所は、推定強度が低くなっているのがわかる。なお、図中赤線は、平均値 m、黒線は平均値 m から標準偏差 σ を差し引いた値である。図から、内部変状が発生している箇所は、透過弾性波速度及び推定強度共に m-

σ 以下となっている。この結果は、閾値の設定方法に検討の余地が残るものの、機械インピーダンス法によって層状ひび割れの検出が可能であることを示唆するものである。

4.4 機械インピーダンスの平面分布

図-8は、今回実験を行った26測定区間の内の1区間に対し、20cm四方のメッシュを印し、メッシュ交点を測定点とし面的に測定を行った結果である。図は、得られた機械インピーダンスから推定強度に変換している。実際の測定面は写真-4の通りである。側壁上部、赤枠で囲んだ範囲で目視により表面ひび割れ等の発生が確認されている。この測定区間の表面ひび割れ発生箇所から採取したコアには層状ひび割れが確認された。

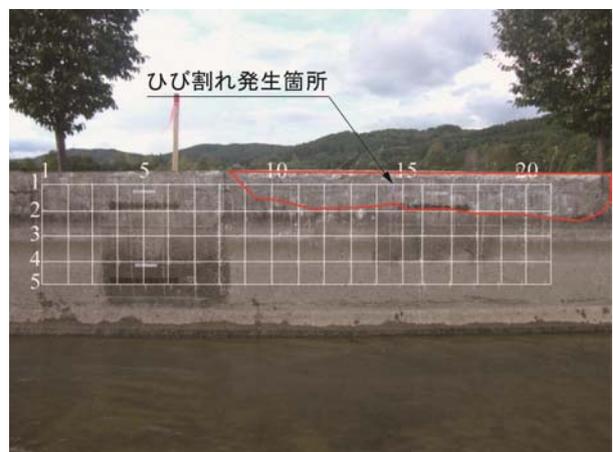


写真-4 測定メッシュとひび割れ発生状況

測定結果の色相は、暖色ほど推定強度が低く、寒色ほど推定強度が高いことを示している。また、色分けは、測定面全体の平均値24.9N/mm²と標準偏差9.70を基準に色分けを実施しており、橙色以降は平均値と標準偏差の差より推定強度が低いことを示している。図からわかる通り、強度が低い箇所と実際に変状が発生している箇所は概ね一致している。非破壊試験では、相対評価によっ

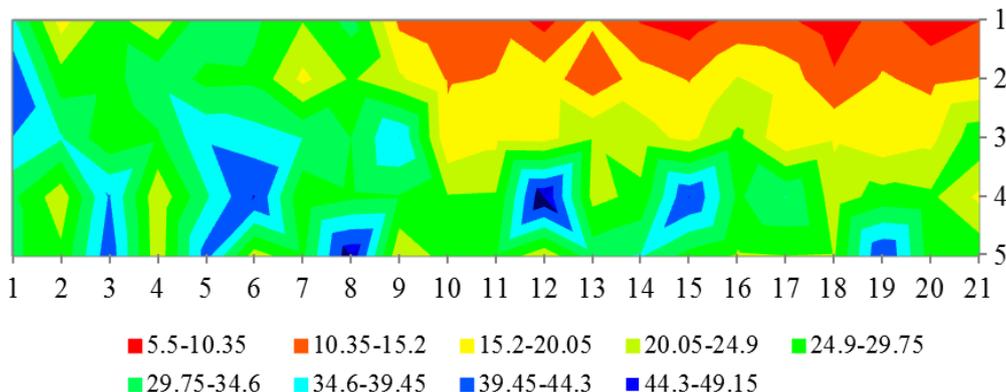


図-8 推定強度の平面分布

てコンクリートの状態を評価する。比較対象となる測定データは多いほど結果に対する信頼性は向上すると考えられる。機械インピーダンス法による測定は、ハンマでコンクリート表面を打撃するだけであり、1点の測定に要する時間は2秒以内と速く、多点測定に適している。

5. まとめ

機械インピーダンス法を用い、実際のコンクリート開水路を対象に内部変状(層状ひび割れ)を検出できるか実験を行った。その結果を以下に示す。

- (1)コンクリート開水路は、最多頻度水位の上側(気中部)と下側(水中部)で表面の状態が大きく異なるが、表面状態の影響を除去した測定結果を得ることができた。しかし、適用範囲が存在すると考えられ、どの程度までであれば本法の適用が可能であるか検討が必要である。今回の結果からは、少なくとも速度比が1.5以下であれば、本法の適用が可能であると言える。
- (2)層状ひび割れ部の打撃力波形は、健全部と比較して打撃力の最大値が小さく、打撃の継続時間が長い傾向を示すが、波形そのものに乱れは小さく、左右対称に近い波形が得られた。
- (3)層状ひび割れなど、内部に変状が発生している場合は、機械インピーダンス値が低下することが分かった。今回の実験では、全体の平均値と標準偏差を基準にした

場合、平均値－標準偏差以下となった場合は、内部に変状が発生している場合が多かった。

- (4)面的に測定を行う事で、損傷範囲の絞込み、平面分布の把握が可能であることが分かった。
- (5)機械インピーダンスを測定することで、層状ひび割れ等の内部変状をある程度検出できることが分かったが、その閾値の設定方法と検出できる深さについては、検討が必要である。

参考文献

- 1) 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 78(5), pp.29-33, 2010.5
- 2) 久保元, 金田重夫, 久保元樹, 極檀邦夫: ハンマ打撃によるコンクリート強度の推定, コンクリート工学, Vol.44, No.5, pp.41-44, 2006.5
- 3) N.J.Carino,M.Sansalone,N.N.Hsu : A Point Source-Point Receiver, Pulse-Echo Technique for Flaw Detection in Concrete , ACI JOURNAL / March-April 1986, pp.189-208
- 4) 極檀邦夫, 久保元樹, 境友昭, 久保元: 機械インピーダンスによる円柱供試体の圧縮強度の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.26,No.1,2004, pp.1995-2000