

論文 超音波法を用いた研磨法による凍害劣化深さの診断手法の検討

周藤 将司*1・高田 龍一*2・緒方 英彦*3・服部 九二雄*4

要旨: コンクリートの凍害劣化深さを超音波法で診断する方法としては、現在コア法が提案されている。しかし、コア法では、事前作業として鉄筋探査を行う必要があり、広範囲で複数箇所の診断を行うのに多大な時間と労力を必要とする。本研究では、凍害劣化深さを超音波法で診断する方法の一つとして研磨法の検討を行った。検討にあたっては室内実験を実施し、さらに、凍害を受けている水路における現地試験により、本方法の実用性について検討を行った。

キーワード: 表面法, 研磨法, 超音波伝播速度, 非破壊試験

1. はじめに

凍害によって劣化したコンクリート構造物の診断、補修時には、劣化部の除去と残存部の健全度の評価を適切に行う必要がある。その際に重要な指標となるのが、凍害劣化深さである。現在、凍害劣化深さを超音波法で調査する方法としてコア法が提案されている¹⁾。これは調査対象の実構造物からコアを採取し、そのコアおよび採取跡を用いて超音波伝播速度等の測定を行い、凍害劣化深さを推定する方法である。実構造物からコアを採取する際には、事前作業として鉄筋探査などを行う必要があり、実際に測定を開始するまでに多くの段階を踏まなければならない、多大な時間や労力を必要とする。この問題は測定が広範囲で複数箇所に及ぶほど顕著となり、また、コアの採取に当たっては構造物自体の損傷だけではなく、鉄筋の損傷を招く可能性もあり、構造物の安全性への影響も懸念される。

本研究では、コア法の課題を解決するため、研磨法による凍害劣化深さの診断方法について検討を行った。研磨法は、コアを採取することなく、コンクリート用のグラインダーを用いて表面を研磨し、研磨後の表面を利用し、超音波による表面法を利用して凍害劣化深さの診断を行う方法である。

超音波法には、探触子の設置方法により直接法や表面法などの測定方法がある。表面法の測定は、探触子を同一表面上に設置して行う方法である。元来、表面法における超音波伝播経路は反射波を測定するものと考えられてきたが、伝播距離が探子間距離とほぼ等しくなることが近年の研究結果から明らかになっている²⁾。また、表面法による判定について一定の信頼性も得られている³⁾。

本文では、超音波法を用いた研磨法による凍害劣化深さの具体的な診断方法を室内実験で検討し、さらに、得

られた傾向を基に凍害を受けている実構造物において研磨法の実用性の検討を行った結果について示す。

2. 研磨法による凍害劣化深さの診断の基本的考え方

近年の研究結果から、表面法による測定の信頼性は高まってきており、それを実際の現場での測定にどのように適用していくかの検討が重要となっている²⁾。本研究では研磨面を利用して表面法による超音波伝播速度の測定を深さ方向に繰り返していくことで、凍害劣化深さの評価を行うことができるのではないかと考えた。

凍害劣化が表面から進行するならば、劣化が進行していない段階ではコンクリートの内部だけでなく表面部も健全な状態を保っていることになり、表面部と内部の超音波伝播速度はほぼ一定に近い値をとるものと考えられる。そのために、凍害劣化深さの先端より深い位置の超音波伝播速度は、表面から凍害劣化深さの先端までの伝播速度より大きく、かつほぼ一定に近い値をとると考えられる。その変化位置を見出すことができれば、表面からその位置までの距離を凍害劣化深さとすることができ、凍害劣化が進行して補修、補強を必要とする部位が特定されると考えられる。

ここでは、健全部から劣化部へ移る変化位置を見出すことを目的として実験を行った。

3. 室内試験

3.1 試験方法

本研究で使用するコンクリートの示方配合とフレッシュ性状を表-1、材料の物理的性質を表-2にそれぞれ示す。

凍結融解試験は、JIS A 1148-2001の水中凍結融解試験方法(A法)に準じて行った。試験は材齢14日より開始し、測定項目は気中質量、長さ、超音波伝播時間(超音

*1 松江工業高等専門学校 生産・建設システム工学専攻

*2 松江工業高等専門学校 環境・建設工学科教授 博士(農学) (正会員)

*3 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)

*4 鳥取大学 農学部生物資源環境学科教授 博士(農学) (正会員)

表-1 コンクリートの示方配合とフレッシュ性状

目標スランブ (cm)	W/C (%)	目標空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				AE 剤 (g/m ³)	フレッシュ性状	
				W	C	S	G		スランブ(cm)	空気量(%)
8±1.5	55	3±0.5	49	165	300	850	953	30	7.3	2.9

表-2 材料の物理的性質

	表乾密度(g/cm ³)	吸水率(%)	粗粒率
セメント(普通ポルトランドセメント)	3.15		
細骨材	2.55	1.5	2.8
粗骨材	2.74	0.98	6.64

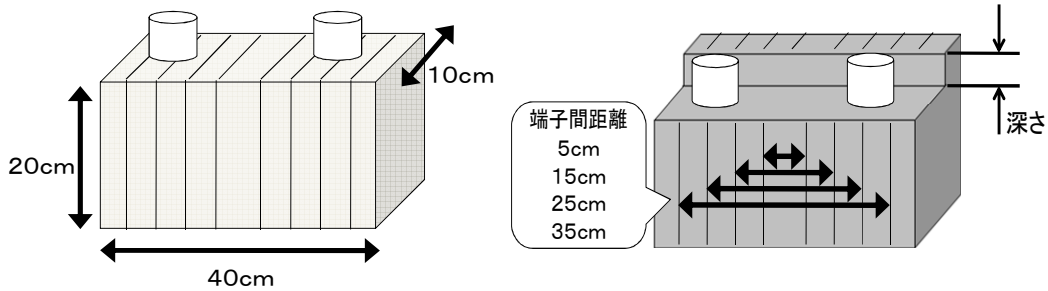


図-1 表面法による超音波伝播速度の測定

波伝播速度), 一次共鳴周波数(動弾性係数)である。

本実験では、深さ方向での劣化の診断を目的としているため、通常の凍結融解試験に用いる供試体とは異なり10×20×40cmの角柱供試体を作製した。また、劣化の進行状況を確認するために通常の10×10×40cmの角柱供試体をコントロール用として作製した。

超音波伝播速度の測定は凍結融解試験終了後、表面のスケーリング部を洗い流した後に表面法で行い、供試体中央を中心として、探子間距離を5, 15, 25, 35cmと変えて測定を行った。超音波伝播速度の測定の詳細を図-1に示す。なお、超音波測定装置には超音波伝播時間がデジタル表示されるものを用いており、波形の判読は行っていない。また、この装置の探触子の直径は38mmである。凍結融解試験開始前の劣化が生じていない段階での初期値は、左図の状態に測定した。凍結融解回数が進行し供試体が劣化した後では、コンクリート用のグラインダーを用いてコンクリートを表面から深さ方向に徐々に研磨していき、右図のように測定した。研磨は、状況に応じて3mm、または5mmの深さまでを行い、供試体表面の半分程度の面積を一様に行った(写真-1を参照)。ここで、今回用いたグラインダーは、無負荷回転数6800回/分であり、刃にはダイヤモンドカップホイールを使用した。研磨法による測定は凍結融解試験開始前の0サイクル時(供試体番号:D1~D3)と、凍結融解試験の230サイクル(供試体番号:M1~M3)、330サイクル(供試体番号:M4~M6)の終了時にそれぞれ行った。したがって、劣化した供試体による測定は、初期値と劣化度の異なる2水準である。供試体数は、各測定とも3本であ



写真-1 30mm削った後の供試体

表-3 圧縮強度

材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)
7	9.5
28	15.8
56	23.5
91	26.0

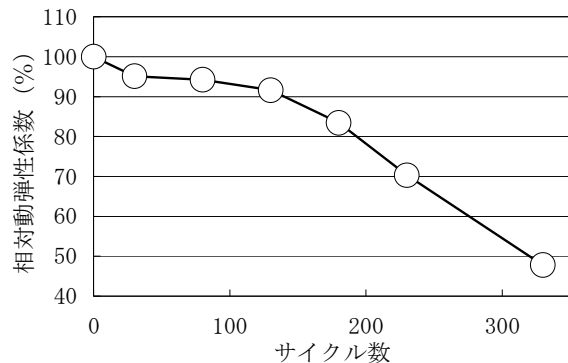


図-2 コントロール用供試体の相対動弾性係数

る。

3.2 試験結果と考察

今回使用したコンクリートの圧縮強度試験の結果を表-3に示す。

図-2 にコントロール用供試体で測定した相対動弾性係数を示す。相対動弾性係数は以下の式によって求めた。

$$\text{相対動弾性係数}(\%) = f_n^2 / f_0^2 \times 100 \quad (1)$$

f_n : n サイクル時の一次共鳴振動数(Hz), f_0 : 凍結融解試験開始前の一次共鳴周波数(Hz)

測定時における相対動弾性係数は、230 サイクル終了時で70%, 330 サイクル終了時で48%であった。また、330 サイクル終了時の質量減少率は4.8%であった。

図-3 に10×20×40cmの供試体を深さ方向に削った際の各深さにおける超音波伝播速度を初期値と併せて示す。230 サイクルでは、供試体が破損したために2本の供試体で測定を行った。各供試体の測定結果は、個体差によるばらつきが大きいため、図では平均値を示さず、各供試体の測定結果をそのまま示す。なお、超音波伝播速度は4箇所で行った計測結果から、最小二乗法を用いて求めたものである。以下に式を示す。

$$V = L/T \quad (2)$$

V : 超音波伝播速度(km/s), L : 伝播距離(端子間距離)(mm), T : 超音波伝播時間(μ s)

劣化が生じていない初期値では、表面部と内部では超音波伝播速度に大きな差は生じないものと考えられたが、深さ5mmの位置で急激に値が低下し、それ以下は若干変動するもののほぼ同程度の値を示した。深さ0mmにおける表面部の超音波伝播速度が他よりも大きいのは、コンクリートの表面をグラインダーで研磨していく過程で生じる微細なひび割れが影響していると考えられる。また、超音波伝播速度の変動については、測定箇所の局所的な状態の影響を受けやすい表面法の測定上の特徴が影響していると考えられる。

相対動弾性係数70%および48%の劣化後の測定では、供試体ごとのばらつきは見られるものの、表面部は劣化が激しく、初期値と比べ超音波伝播速度が小さくなっていることがわかる。さらに、内部へ研磨を進めるに従って表面部よりも伝播速度が大きくなる傾向が見られ、そしてある程度の深さになると、伝播速度が一定に落ち着く傾向にあることがわかる。しかし、この一定の値は初期値より小さくなっており、初期値で述べたようにグラインダーで研磨していく過程で生じる微細なひび割れが影響を与えていると推測される。

グラインダーによる影響は、研磨前後の値の比較を行う際には障害となるが、影響が一様に現れるものとするれば、研磨後の各深さ同士の値を比較する際にはグラインダーの影響を相殺しあうことになる。この仮定を利用す

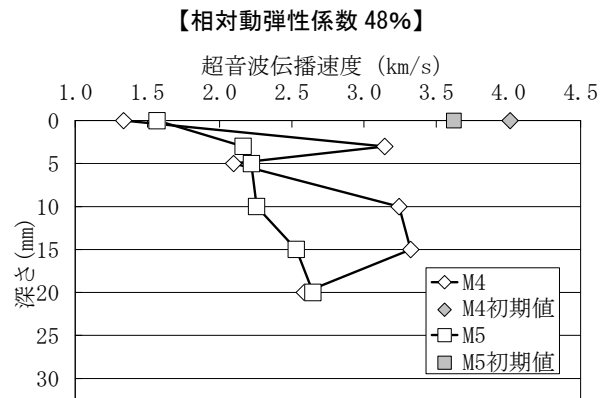
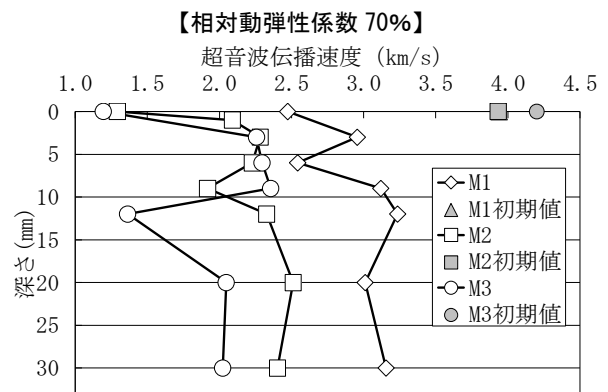
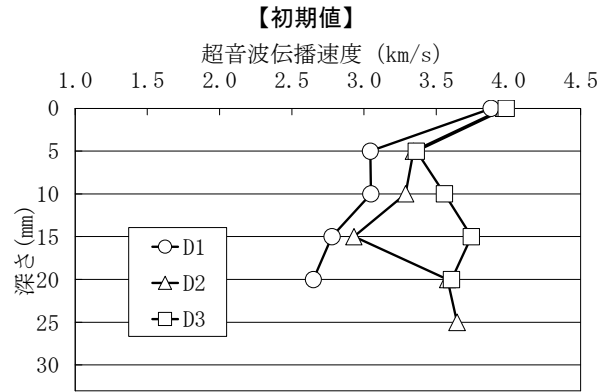


図-3 表面から深さ方向の超音波伝播速度

ることによって、劣化度の評価は十分に行えるものと考えられる。

また、多くの供試体で、急激に超音波伝播速度が小さくなる位置が存在し、この位置が凍結融解作用による影響を最も受ける最深部の境界面であると考えられる。凍結融解作用が一様ではなく、表面から内部へと進行していくとすれば、劣化の先端部では内部の凍結時の膨張圧を繰り返し受け、コンクリート組織の緩みが特に生じるためにこのような現象が起こるものと考えられる。この現象を利用することにより、研磨深さの測定結果から超音波伝播速度の小さくなる位置を特定することができれば、凍害劣化深さの推定を行うことも可能であると考えられる。

また、今回測定に用いた供試体は奥行きが 10cm と薄いために、測定結果には横方向からの劣化の影響も含まれているものと思われる。実構造物を測定する場合には広範囲における測定が主となるので、このような配慮を行う必要性は低いと思われるが、実験室レベルでの検討を進めていく上では、測定方法、特に供試体のサイズについて今後十分な検討を要すると考えられる。

これらの結果より、今後更なる検討を要するものの、表面法を用いた研磨法は、凍害劣化深さを診断するための一つの方法として挙げることができると考えられる。

4. 研磨法の現場適用試験

4.1 試験概要

ここでは、前章までに検討した超音波法を用いた研磨法による凍害劣化深さの診断手法を、供用中の凍害劣化が進行している構造物に適用した結果について示す。現地試験は、北海道内を東西に流れる開水路で行った。対象とした開水路の側壁背面は、土中に埋もれている状態であった。測定は、降雨後を避け、コンクリート表面が乾燥している状態で実施した。測定箇所は、凍害劣化の影響を受けやすい北側壁面において劣化度の異なる3箇所であり、灌漑時にそれぞれ気中部と水中部に当たる部分の計6箇所で行った。測定方法は3章と同じく、グラインダーで表面を研磨しながら表面法による測定を繰り返し行い、深さ20mmまで測定を行った。表面法の測定の端子間距離は10, 20, 30cmであり、最小二乗法を用いて超音波伝播速度を求めた。測定箇所のそれぞれの状態は表-4に示す通りである。また、研磨を行う前の開水路の状態を写真-2に示す。ここで、表-4および写真-2から分かるように、開水路においては、非凍結期の灌漑期において水中に浸かる水中部に凍害劣化が顕著に生じず、気中部に凍害劣化が生じやすい特徴があることを追記しておく。

4.2 試験結果と考察

気中部と水中部のそれぞれ部分における深さ方向の超音波伝播距離の変化を図-4に示す。

気中部と水中部の両者とも目立った凍害劣化が見られないNo.1では、深くなるほど超音波伝播速度が小さくなり、かつ一定の値になる傾向が見られた。ただし、気中部では、室内試験でも見られたような急激に超音波伝播速度の小さくなる位置が存在した。目視的に凍害劣化の発生が明らかなNo.2とNo.3の気中部では、それぞれ2.5mm, 5mm以降の深さでは超音波伝播速度の測定が不能であり、目立った凍害劣化が見られない水中部よりも格段に小さくなった。

No.1の気中部に見られるように、実際の構造物においても急激に超音波伝播速度の小さくなる位置が存在し、

表-4 各測定部の状態

	気中部	水中部
No.1	目立った劣化なし	目立った劣化なし
No.2	削ると内部から水分が浮き出す 深度5mmでは骨材の欠損が発生	目立った劣化なし
No.3	エフロ、サビ汁の流出	目立った劣化なし

【No. 1】



【No. 2】



【No. 3】



写真-2 測定箇所

また研磨法でこの位置を特定することができたことから、凍害劣化深さを診断するための一つの方法として研磨法の実用性が示唆される。ただし、今回の現地試験からは、次のことも示唆される。凍害診断を行う際に凍害劣化の進展期までの段階であれば、研磨法を用いての凍害劣化深さの診断は可能であると考えられる。しかし、エフロッセンスなど目視的に凍害劣化が明らかに確認されるような凍害劣化の加速期、劣化期に入った段階の

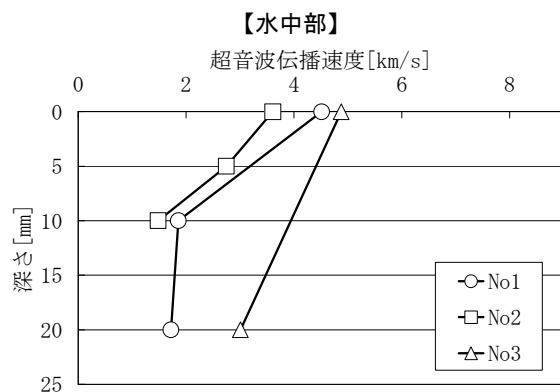
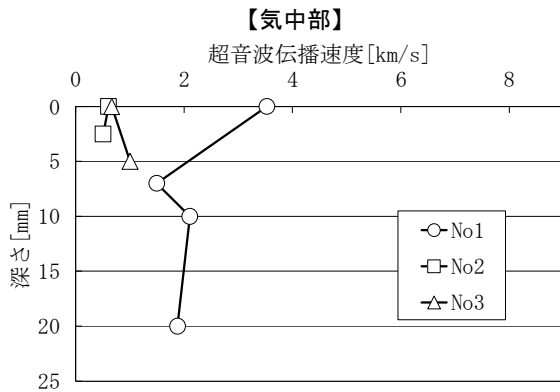


図-4 深さ方向における超音波伝播速度

構造物では、研磨法を用いての超音波伝播速度の測定は物理的に不可能であり、コア法など他の測定方法を用いて診断を行わざるを得ない。

5. おわりに

本文では、超音波法を用いた研磨法による凍害劣化深さの診断手法の検討を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 研磨法で凍害劣化深さの診断を行う場合、研磨する過程で微細なひび割れが生じるために、表面部の超

音波伝播速度は研磨面で測定される内部よりも大きくなる。このことから、表面部の測定値を評価対象とするのではなく、各研磨深さで測定される値を対象として評価すべきである。

- (2) 表面から凍害劣化が進行したコンクリートでは、超音波伝播速度が急激に小さくなる位置が存在し、それより深い位置での超音波伝播速度はほぼ一定になる傾向がある。研磨法では、超音波伝播速度が急激に小さくなるこの位置を特定することが可能である。
- (3) 実際の構造物で研磨法による凍害劣化深さの診断を行う場合、凍害劣化の進展期までの段階であれば評価が可能であるが、加速期、劣化期の段階では評価が不可能である。

今回の結果から超音波法を用いた研磨法により、凍害劣化深さの診断が行える可能性が明らかとなった。今後は、室内試験における供試体のサイズ等についても再考し、信頼性を高めるための試験を積み重ねることが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 林田宏, 田口史雄, 嶋田久俊: 超音波伝播速度測定による実コンクリート構造物の凍害深さ推定について, 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, pp.71-76, 2006.12
- 2) 高田龍一, 周藤将司, 藤山貴史, 緒方英彦, 服部九二雄: 超音波伝播速度を利用した凍害診断手法に関する基礎的研究, 農業土木学会中国四国支部講演会講演要旨集, Vol.61, pp.77-79, 2006.10
- 3) 緒方英彦, 高田龍一, 周藤将司, 服部九二雄, 超音波端子の設置方法がコンクリートの耐凍結融解性の評価に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.661-666, 2007

