

論文 超音波法によるコンクリートの耐凍結融解性能評価に関する検討

高田 龍一^{*1}・郭 世文^{*2}・緒方 英彦^{*3}・服部 九二雄^{*3}

要旨：非破壊検査の一つである超音波法は、動弾性係数測定試験よりも測定作業が簡便であり、任意のサイズや形状の供試体に対して適用できると同時に実構造物の調査に対しても適用が可能である。そこで、本研究では A 法（水中凍結水中融解試験）と B 法（気中凍結水中融解試験）によって得られた試験結果を用いて、超音波法によるコンクリートの凍結融解試験結果評価方法の妥当性について検討を行った。

キーワード：非破壊試験，動弾性係数，超音波伝播速度，凍結融解試験

1. はじめに

近年，メンテナンスフリーで半永久的に利用できると考えられてきたコンクリートの早期劣化が大きな問題となっており，耐久性能を確認するための維持管理手法が重要な課題となっている。そのひとつとして，山間部や寒冷地を中心とした気象作用による凍害についても非破壊試験による照査方法が求められており，その有効な手段を確立する必要がある。

従来，コンクリートの耐凍結融解性能を照査するための凍結融解試験結果の評価にあたっては，相対動弾性係数と質量減少率が用いられてきた。しかし，相対動弾性係数を求めるために行う動弾性係数測定試験では，多大な労力と時間を必要とし，任意の供試体サイズや形状に適用できないという制約がある。さらに，コンクリート構造物の耐凍結融解性能を調査するためには，構造体から多くのコアを採取しなければならない。このように構造体から数多くのコアを採取することは，構造体の機能や耐久性を損なう恐れがあり，これに代わる非破壊試験による照査方法を検討する必要があると考えられる。

著者らは，このような視点から凍結融解試験結果の評価方法について着目し，一連の研究に

おいて超音波伝播速度と動弾性係数の関係について検討を行ってきた。既報において，B 法（気中凍結水中融解試験）（JIS A 1148）による凍結融解試験結果の評価に超音波法による評価の妥当性について検討を行った¹⁾。

本研究においては，B 法に併せて A 法（水中凍結水中融解試験）（JIS A 1148）による試験結果の評価への超音波法の適用の信頼性と妥当性について検討を行った。

さらに，コンクリートの凍結融解試験で規定されている供試体は，断面の一辺が 10cm で長さが 40cm の角柱供試体である。ここで，角柱供試体の超音波伝播速度を測定する場合は，供試体を横方向に置き，角柱供試体の縦断方向の超音波伝播速度を測定するのが一般的である。しかし，供試体の劣化状況によっては，縦断方向での測定がしばしば不可になることがあり，この場合超音波法による凍結融解試験結果の評価を行うことができない。

そこで，本研究において，角柱供試体の縦断方向における超音波伝播速度の測定が不可である場合の対処方法として，横断方向の測定値を用いた凍結融解試験結果の評価方法について検討を行った。

*1 松江工業高等専門学校 土木工学科教授 農博（正会員）

*2 鳥取大学院連合農学研究科

*3 鳥取大学 農学部生物資源環境学科助教授（博）農（正会員）

*3 鳥取大学 農学部生物資源環境学科教授 農博（正会員）

2. 凍結融解試験および評価方法の概要

2.1 凍結融解試験の概要

本研究では 2 シリーズの凍結融解試験を行った。各シリーズの凍結融解試験に用いた供試体の示方配合を表 1 に示す。

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は鳥取県産の山砂、粗骨材は鳥取県津産の碎石、水は水道水を使用した。また、ここでは評価方法の検討を目的としているため広範囲なデータ評価を必要とし、耐凍結融解性能の低領域の値を得るように、セメントをフライアッシュで、細骨材を吸水性の高いシンダ - アッシュで置換し、さらに耐凍結融解性能の向上に欠かせない AE 剤をあえて使用しない 3 種類の角柱供試体を 3 体ずつ作製した。したがって、3 種類全ての配合に細骨材代替として 10% のシンダ - アッシュを用い Case1 では 10%、Case2 では 20%、Case3 では 30% のフライアッシュをセメントの内割りで使用した。なお、フライアッシュ、シンダ - アッシュは、島根県三隅産のものを使用した。

2 シリーズ目の凍結融解試験に用いた供試体は、1 シリーズ目の供試体を用いて行った A 法の試験結果を踏まえ、さらに低領域のデータが得られるように水セメント比を 60% とし、混和材料などの配合条件は 1 シリーズ目の供試体と同様な条件とした。細骨材は鳥取市伏野産の山砂、粗骨材は岡山県津山北部産の碎石、水は水道水、フライアッシュ、シンダ - アッシュは 1

シリーズ目と同様に三隅産のものを使用した。なお、材料の物理的性質を表 2 に、それぞれのシリーズのコンクリートのフレッシュ性状を表 3 に示す。示方配合においては、比較的コンシステンシーの小さい土木用コンクリートのスランプで設計を行ったが、フライアッシュ、シンダ - アッシュを用いることによりスランプ値は大きく低下した。

凍結融解試験方法は、JIS A 1148 にしたがって A 法および B 法のそれぞれの試験方法について行った。なお、2 シリーズ目の供試体は水セメント比が高く、シリーズ 1 より早期劣化が予測され、低領域のデータをよりきめ細かく得るため測定間隔を短くした。測定指標としては質量、一次共鳴振動数、超音波伝播速度を測定した。

超音波伝播速度の測定にあたっては、測定の個人誤差を無くするため自動デジタル回路方式超音波非破壊試験器を使用し、振動子周波数 50KHz で、振動子にグリースを塗付し供試体に押し当てることにより計測可能な範囲で測定した。なお、結果の整理にあたっては相対値を利用しているが、本試験において計測可能であった超音波伝播速度の最低絶対値は 1,000m/sec 程度であった。

2 シリーズ目の凍結融解試験では、フライアッシュを混和材として用いていることからポゾラン反応による長期強度の増進が耐凍結融解性能に及ぼす影響を検討するために 14 日試験開始材齢と同時に 91 日試験開始材齢について試験を行

表 - 1 示方配合

配合の種類	セメントの種類	最大骨材寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント 比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
							水	セメント	細骨材	粗骨材
1シリーズ	普通ポルトランド	20	12	2	55	48.2	206	374	819	914
2シリーズ	普通ポルトランド	20	12	2	60	49	207	344	871	894

表 - 2 材料の物理的性質

	山砂 (1シリーズ)	山砂 (2シリーズ)	碎石	FA	CA
密度 (g/cm ³)	2.60	2.63	2.60	2.13	1.92
粗粒率	1.44	2.8	6.47	-	-
吸水率 (%)	1.21	1.03	2.65	-	4.36

FA: フライアッシュ CA: シンダ - アッシュ

表 - 3 各シリーズにおけるコンクリートのフレッシュ性状

シリーズ	1シリーズ			2シリーズ		
	Case1	Case2	Case3	Case1	Case2	Case3
スランプ (cm)	1.9	1.8	1.6	4.0	6.5	7.8
空気量 (%)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

った。しかしながら，14 日試験開始材齢については，本報告に即した十分なデータを得ることができなかつたため，結果の整理にあたっては，91 日試験開始材齢にて試験を行った結果をもとに報告することとした。

なお，試験開始材齢，養生条件など耐凍結融解性能に及ぼすと考えられるいくつかのファクターによる影響については，別途報告することとする。

横断方向の超音波伝播速度を用いた評価方法の検討にあたっては，A 法，B 法のそれぞれの試験に基づいて検討を行った。A 法については，2 シリーズの試験に併せて実施し，B 法については 1 シリーズの配合に基づいて単独に試験を実施した。

2.2 凍結融解試験結果の評価方法の概要

動弾性係数と超音波伝播速度の関係を示すにあたっては，既報において述べたようにいくつかの方法が明らかである。しかしながら，本研究の目的とするところは，より簡便で信頼性のある評価方法を示すことにあるため，ここでは実測した超音波伝播速度のみを利用した評価手法について検討することとした。

現行の評価手法である相対動弾性係数は式(1)で表すことができる。

$$E1 = f_n^2 / f_o^2 \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

E1：たわみ振動による一次共鳴振動数の平方値を利用した相対動弾性係数

f_n ：サイクル数 n のときの測定した一次共鳴振動数 (Hz)

f_o ：凍結融解試験開始前に測定した一次共鳴振動数の初期値 (Hz)

次に，実測した超音波伝播速度を利用した評価方法として，まず著者らが過去の試験データに基づいて導いた式(2)で示される超音波伝播速度と動弾性係数の関係を利用した評価手法を適用することとした¹⁾。

$$Ed1 = 4.0387VL^2 - 14.438VL + 20.708 \quad (2)$$

Ed1：過去の試験結果から得られた超音波伝播速度を用いた動弾性係数(GPa)，

VL：超音波伝播速度(km/s)

式(2)から求まる動弾性係数を利用して，式(3)により相対動弾性係数を導くことができる。

$$E2 = Ed_n / Ed_o \times 100 \quad (\%) \quad (3)$$

E2：式(2)の動弾性係数を用いて求まる相対動弾性係数

Ed_n ：サイクル数 n の超音波伝播速度から評価した動弾性係数

Ed_o ：凍結融解試験開始前に測定した超音波伝播速度から評価した動弾性係数

次に，実測の超音波伝播速度を直接利用した評価方法として，式(4)により求まる相対超音波伝播速度による評価を行った。

$$E3 = VL_n^2 / VL_o^2 \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

E3：直接得られた超音波伝播速度の平方値を利用した相対超音波伝播速度

VL_n ：サイクル数 n の超音波伝播速度 (km/s)

VL_o ：試験開始前に測定した超音波伝播速度 (km/s)

本研究では，以上の評価式から示される E2 あるいは E3 で与えられる超音波伝播速度に基づいた評価指標の信頼性，妥当性について検討することとする。検討にあたっては，より理論的な信頼性を与えるために，各評価指標の相関関係について解析を試みた。

横断方向の測定値を用いた凍結融解試験結果の評価方法の検討にあたっては，E3 として求まる相対超音波伝播速度の値を適用した。横断方向における測定は，供試体の縦断方向(40cm)を両端(両端から 5cm)および中央部の 3 断面について行った。

3. 試験の結果と考察

3.1 相対動弾性係数と相対超音波伝播速度の相関性

図 1 に各シリーズの凍結融解試験における質量減少率を示している。水セメント比 55% の 1 シリーズでは，スケーリングを起こすことなく劣化しているのに比して水セメント比 60% の 2 シリーズでは，いずれの試験方法，供試体にお

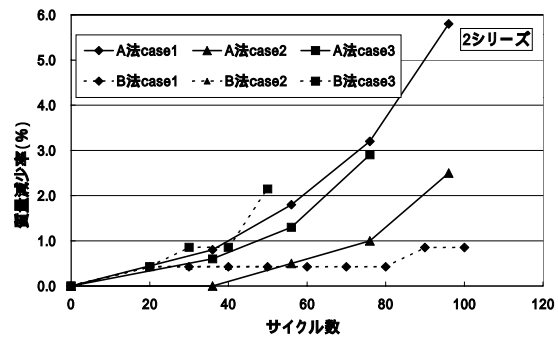
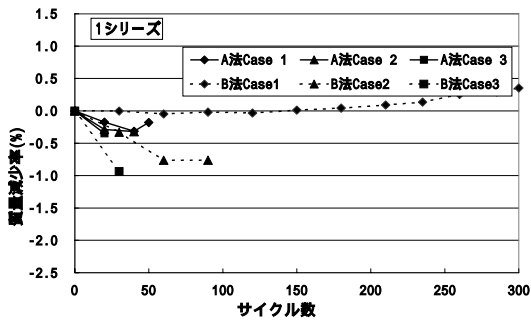


図 1 質量減少率の推移

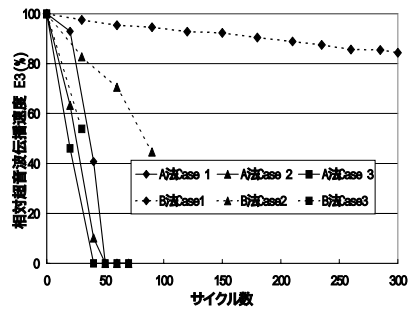
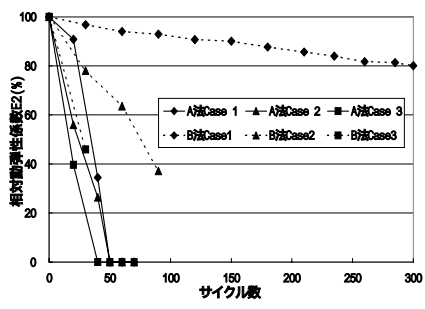
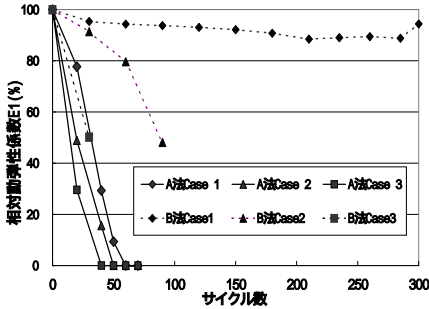


図 2 1シリーズの相対評価値

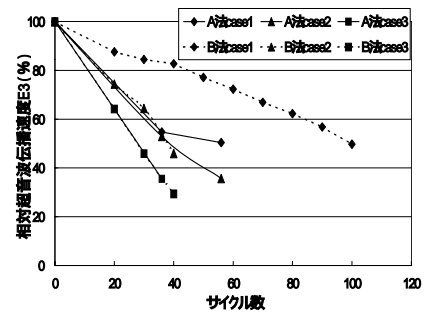
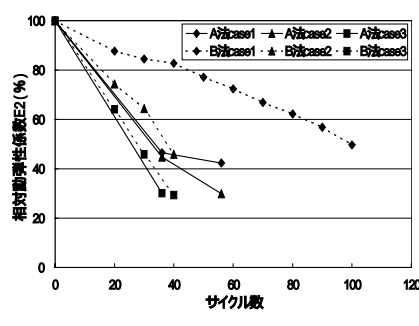
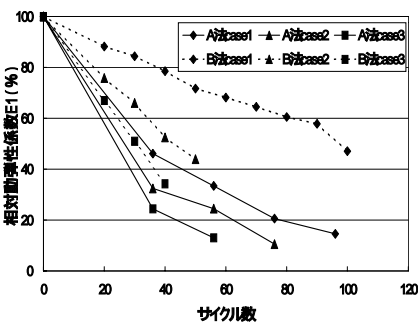


図 3 2シリーズの相対評価値

いても早期のサイクルからスケーリングを起こしているのが特徴である。

図 2 に 1 シリーズの、図 3 に 2 シリーズの $E1$, $E2$, $E3$ で表される各相対値による結果を示している。

従来の評価指標である相対動弾性係数 $E1$ に対して、超音波伝播速度を利用した $E2$, $E3$ によって表される相対評価値による結果が、うまく劣化の過程を相似していることがわかる。さらに、この傾向は試験方法や劣化の程度にかかわらずほぼ一致した傾向を示している。

それぞれの評価指標間の関係をより理論的に検討するために、相対動弾性係数 $E1$ と超音波伝播速度を利用した $E2$, $E3$ によって表される相対評価値との相関関係を示したのが図 4、図 5

である。各図とも縦軸に相対動弾性係数 $E1$ を、横軸に $E2$, $E3$ の相対評価値の値をとり、線形近似式を示している。結果の評価にあたり、 $E1$, $E2$, $E3$ は無次元化された相対値であることから 1:1 の関係が成り立つことにより、切片が 0 に近く、両者の相関係数が 1 に近い値を示すことが信頼性の高いことを示すことになる。

図 4 の A 法における評価値 $E2$, $E3$ は、たわみ振動による一次共鳴振動数の平方値を利用した相対動弾性係数 $E1$ と比較して高めの値となっており、結果として幾分危険側に評価していることがわかる。 $E1$ - $E2$ および $E1$ - $E3$ のそれぞれの相関係数は 0.98, 0.97 と高い相関性を示している。

図 5 に示す B 法の結果では、 $E2$, $E3$ のいず

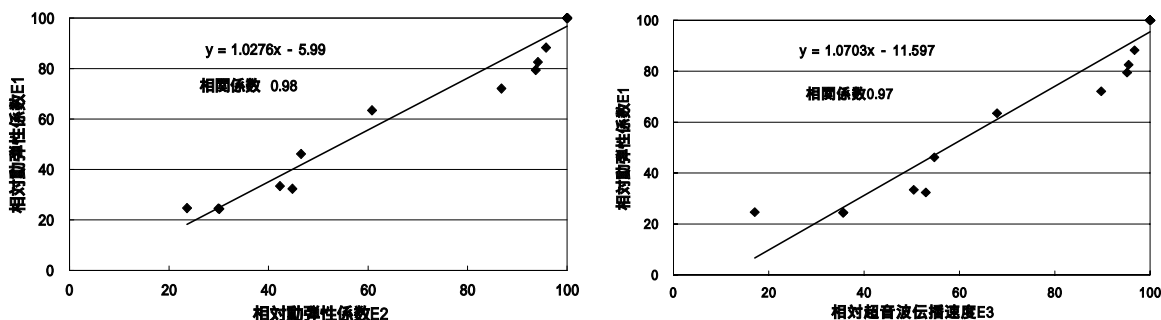


図 4 A 法における相関性

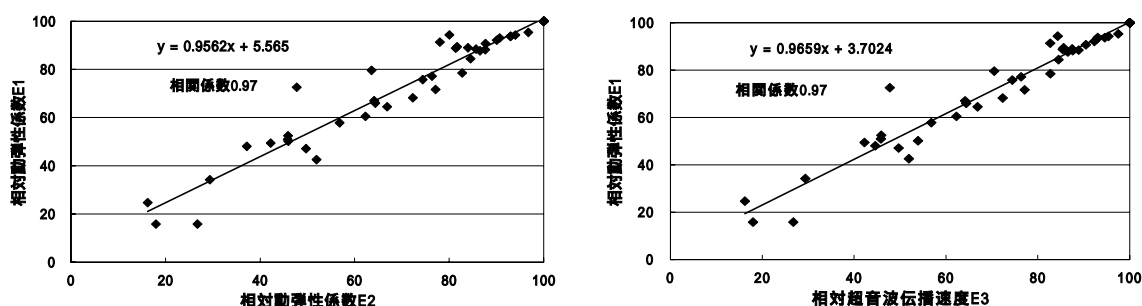


図 5 B 法における相関性

れの値とも A 法とは逆に幾分安全側に評価していることがわかる。B 法における E1- E2 および E1- E3 のそれぞれの相関係数は 0.97, 0.97 となっており, A 法と同様に高い相関性を示す結果となった。

以上のことから, いずれの試験方法においても超音波伝播速度を利用した相対評価値に一定の信頼性が認められ, 特に耐凍結融解性能の低領域の値に対しても充分適応性が認められることから, 現場におけるコンクリート構造物の凍結融解による劣化の評価判定にも有効であると考えられる。

3.2 横断方向における超音波伝播速度

Case1 ~ Case3 の供試体における縦断方向と横断方向の超音波伝播速度を A 法, B 法のそれぞれについて図 6, 7 に示す。図中には, 縦断方向の超音波伝播速度が測定できたサイクルまでの結果を示している。ここで, 縦断方向と横断方向の超音波伝播速度の関係を考察するために, 横断方向における相対超音波伝播速度を次の 4 方法でそれぞれ求めた。No1 は 3 断面における測定値の平均値, No2 は 5, 35cm 断面における測定値の平均値 (両端部), No3 は 20cm 断面に

おける測定値 (中央部), No4 は 3 断面における測定値の最小値である。

A 法の結果を示した図 6 から, 横断方向の各値は測定位置に関係なくほぼ縦断方向の測定結果と一致した値を示しているが, B 法においては, 図 7 から明らかなように測定位置に大きく影響されることがわかる。したがって, A 法の場合, 横断方向の位置に関係なく一様に劣化が進行し, 測定可能ないずれの測定位置を用いても超音波伝播速度による評価が可能であると考えられる。

一方, 図 7 に示す B 法の場合, 横断方向の平均値である No1 および中央位置での測定値 No3 は, 縦断方向の測定値よりも大きくなる。端部の測定値だけを用いた No2 は縦断方向の測定値に近くなり, 横断方向の最小値である No4 は縦断方向の測定値とほぼ同じになる。このことから, 測定される超音波伝播速度は, 伝播距離内の平均値ではなく, 超音波伝播速度が減衰する劣化部分の伝播速度であるといえ, 伝播距離内の最小値であることがわかる。また, 縦断方向における超音波伝播速度の測定が不可能である場合, 横断方向における超音波伝播速度の

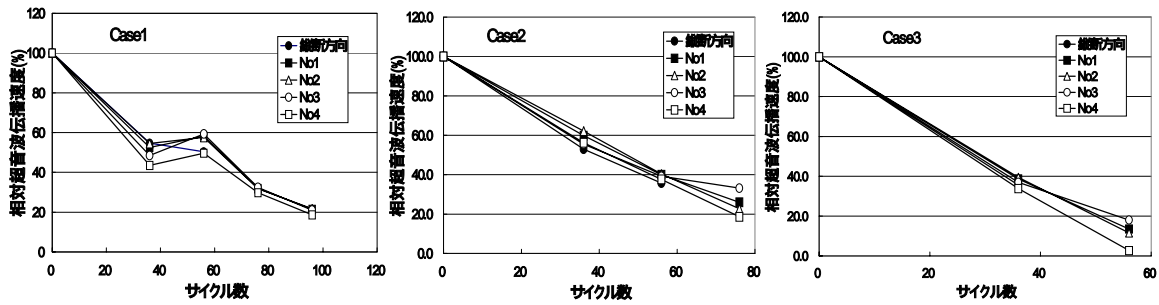


図 6 横断方向の超音波伝播速度(A 法)

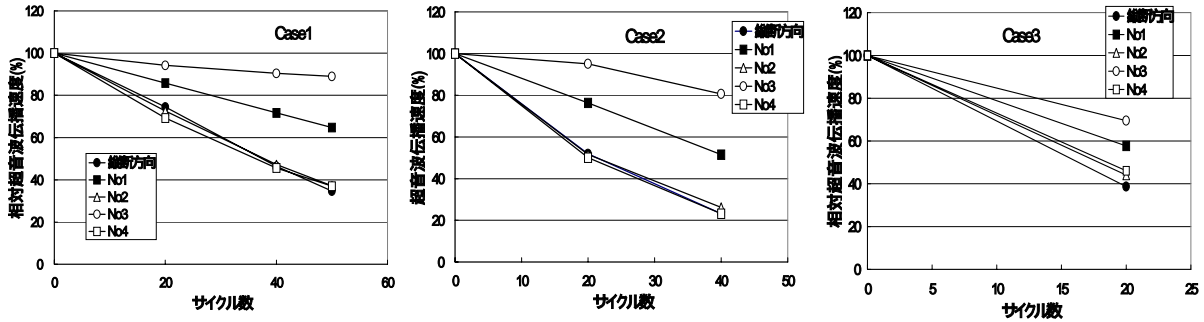


図 7 横断方向の超音波伝播速度(B 法)

最小値を用いることで、耐凍結融解特性の評価が行えることが今回の実験から明らかになった。

また、前節で述べたように相対超音波伝播速度は相対動弾性係数と強い相関性が認められることから、横断方向の相対超音波伝播速度を求めることで、コンクリート供試体の耐凍結融解特性を詳細に検討することができる。特に、B法の試験結果に見られるように、耐凍結融解特性の低下が供試体端部だけで生じているのか、供試体全体で生じているのかを知ることは、対象とするコンクリートの耐凍結融解性能のレベルを検討する上での基礎資料になると思われる。

さらに、JIS A 1148 において凍結融解試験方法として A 法および B 法がそれぞれ規定されているが、劣化の過程が大きく異なる状況を相対超音波伝播速度の評価方法でもうまく捉えることが明らかとなった。

4. まとめ

本研究結果から、A 法、B 法いずれにおいても実測した超音波伝播速度を利用した相対値による凍結融解試験結果の評価は、従来からの評価指標である相対動弾性係数と高い相関性が認められ、実測した超音波伝播速度による評価手法に

一定の妥当性、信頼性が認められた。

特に、本研究において注目した耐凍結融解性能の低領域の値に対しても充分適応性が認められることから、実構造物の凍結融解作用による劣化の診断に適応できることが期待される。

さらに、横断方向の超音波伝播速度の測定による検討結果から、角柱供試体の横断方向における超音波伝播速度の最小値を用いることで耐凍結融解特性の評価が行えること、横断方向の相対超音波伝播速度を求めることでコンクリート供試体の耐凍結融解特性を詳細に検討できることが明らかになった。

今後は、今回得られた結果を踏まえ、現地コンクリート構造物の耐凍害性の照査を行うための具体的方法について検討していく予定である。

参考文献

- 1) 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, H14 年コンクリート工学年次論文集, Vol.24No.1, pp.1563-1568