

論文 超音波探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

緒方 英彦^{*1}・高田 龍一^{*2}・周藤 将司^{*3}・服部 九二雄^{*4}

要旨：超音波法によるコンクリートの耐凍結融解性の評価では、直接法および表面法で超音波伝播速度を測定することになるが、超音波探子の設置方法が評価結果に与える影響は十分に検討されていない。そこで、コンクリートの凍結融解試験を 860 サイクルまで行い、供試体のさまざまな位置で測定した直接法および表面法による超音波伝播速度を比較することで、超音波探子の設置方法が耐凍結融解性の評価結果に及ぼす影響を検討した。

キーワード：超音波伝播速度、直接法、表面法、耐凍結融解性

1. はじめに

コンクリートの耐凍結融解性の評価では、共鳴振動による動弾性係数測定試験から求められる相対動弾性係数が用いられてきた。しかし、この動弾性係数測定試験は、試験の性格上、任意の寸法や形状の試験体に適用することができないなどの制約がある。また、スケーリングにより試験体表面が剥離したり、隅角部が欠落した場合などでは、ピックアップの設置が難しくなったり、場合によっては一次共鳴振動数を測定することができなくなることもある。

一方、超音波伝播速度測定試験は、動弾性係数測定試験よりも簡便であり、任意の寸法や形状の試験体に対しても適用できる。加えて、著者らの既往の研究からは、超音波伝播速度から求められる相対超音波伝播速度と相対動弾性係数がほぼ同様の傾向を示すことが明らかになっており¹⁾²⁾、超音波法による耐凍結融解性の評価は実用性が十分ある方法であると言える。

これまでに、凍結融解試験に供される角柱供試体（10×10×40cm）の縦断方向（伝播距離 40cm）と横断方向（伝播距離 10cm）の超音波伝播速度を比較することで、縦断方向だけでなく横断方向で測定した超音波伝播速度でも耐凍結

融解性を評価できることを明らかにしている²⁾。ただし、この結果は、試験体を超音波探子で挟む直接法で測定した超音波伝播速度についてであり、試験体の同一表面に超音波探子を設置する表面法については検討を行っていない。また、直接法および表面法で測定される超音波伝播速度が、凍結融解作用による劣化状況が異なる試験体のどの部分を評価しているのかも検討を行っていない。

そこで、本研究では、コンクリートの凍結融解試験を 860 サイクルまで行い、供試体のさまざまな位置で測定した直接法および表面法による超音波伝播速度を比較することで、超音波探子の設置方法が耐凍結融解性の評価結果に及ぼす影響を検討した。

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。作製したコンクリート供試体は、凍結融解試験に供する角柱供試体（10×10×40cm）と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）である。各供試体は打設

*1 鳥取大学 農学部生物資源環境学科助教授 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 松江工業高等専門学校 生物・建設システム工学専攻専攻生

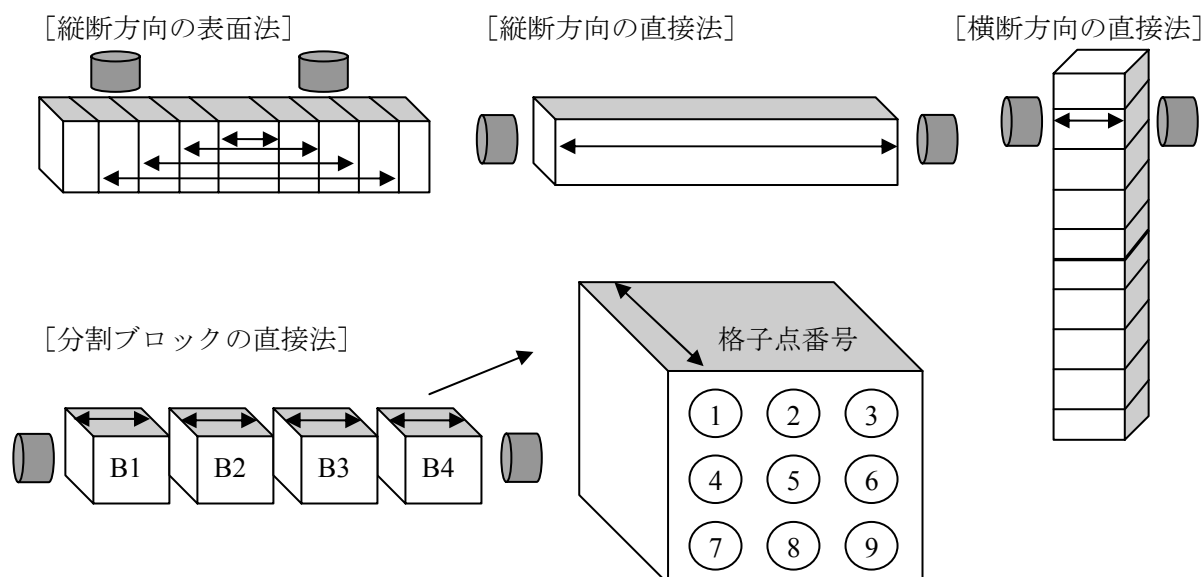
*4 鳥取大学 農学部生物資源環境学科教授 農学博士（正会員）

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	AE 剤 (g/m ³)
20	10±2	55	6±1	39.7	181	328	654	1,040	98

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)	3.16	—	—	—	—
細骨材 (中国産)	2.51	1.73	0.25	1.48	1.85
粗骨材 (鳥取県産砕石)	2.63	1.37	0.82	0.55	6.85



図－１ 超音波伝播速度の測定概要

の翌日に脱型した後、所定の材齢まで標準水中養生を行った。

角柱供試体の凍結融解試験は、JIS A 1148 に準じた A 法（水中凍結水中融解試験方法）で行った。試験開始材齢は、材齢 14 日である。通常行われる凍結融解試験では、300 サイクルまでの結果を用いて耐凍結融解性の評価を行うが、本研究では超音波探子の設置方法が耐凍結融解性の評価結果に及ぼす影響を検討するのが目的であることから、凍結融解作用による劣化がある程度進行する 860 サイクルまで試験を実施した。

凍結融解試験に供した角柱供試体は、50 あるいは 100 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、ブラシでスケーリング部分を除去したうえで行った。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、グリスを用いて発・受振子を供試体に密着させたうえで行った。供試体数は、各測定サイクルとも 3 本である。

表－３ コンクリートの基本的物性

材齢(日)	密度 (g/cm ³)	超音波伝播速度 (km/s)	動弾性係数 (GPa)	圧縮強度 (N/mm ²)
3	2.21	3.83	24.0	10.3
7	2.26	4.18	29.4	14.2
14	2.25	4.19	30.3	13.9
28	2.25	4.34	32.5	20.0

超音波伝播速度の測定は、直接法において、角柱供試体の縦断方向（伝播距離 40cm）と横断方向（伝播距離 10cm）のそれぞれで行い、横断方向では打込み面に対する供試体の側面を測定面として、供試体の長さ方向において端部から 2.5cm 間隔で 9 箇所での測定を行った。表面法では、供試体の長さ方向の中央を基準として発・受振子の間隔を 5, 15, 25, 35cm の 4 段階に変えて測定を行った。測定面は、直接法と同様に打込み面に対する供試体の側面である。また、角柱供試体をコンクリートカッターで長さ方向に 10cm 間隔で 4 分割し、各分割ブロックにおいては 2.5cm 間隔の 9 箇所の格子点で直接法による超音波伝播速度の測定を行った。超音波伝播速度の測定概要を図－１に示す。

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 日に密度、超音波伝播速度、縦振動の一次共鳴振動数による動弾性係数、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。

２．２ 凍結融解試験結果の評価方法の概要

直接法および表面法による超音波伝播速度は、直接法において式(1)、表面法において式(2)で求めた。ここで、表面法では、発・受振子の設置間隔を異ならせた 4 箇所で測定される伝播時間を用いて、最小二乗法により超音波伝播速度を求めた³⁾。

$$V = \frac{L}{T} \quad (1)$$

$$V = \frac{L - \alpha}{T} \quad (2)$$

V : 超音波伝播速度(km/s), L : 伝播距離 (表面法

において探子間中心距離) (mm), α : 補正距離 (mm), T : 伝播時間 (μ s)

相対超音波伝播速度は、式(3)により求めた¹⁾²⁾。

$$\text{相対超音波伝播速度(\%)} = \frac{V_n^2}{V_0^2} \times 100 \quad (3)$$

V_0 : 凍結融解試験前の超音波伝播速度(km/s),

V_n : 凍結融解サイクル n 回における超音波伝播速度(km/s)

３．凍結融解試験の結果と考察

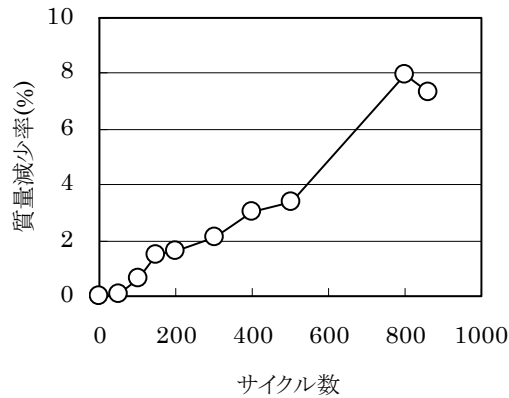
３．１ コンクリートの耐凍結融解性

円柱供試体から求めたコンクリートの基本的物性は、表－３のとおりである。各材齢とも供試体 3 本の平均値である。

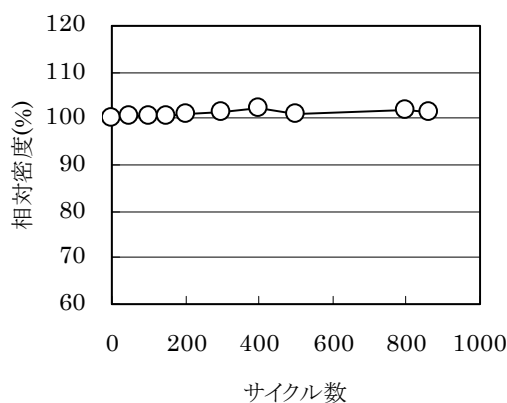
凍結融解試験に供した角柱供試体の凍結融解試験開始材齢 14 日における物性は、任意の 3 本の平均値で密度が 2.23g/cm³、超音波伝播速度が 4.19km/s、動弾性係数が 29.1GPa であった。凍結融解試験では、50 あるいは 100 サイクル毎に任意の 3 本の供試体により各項目の測定を行ったが、凍結融解作用による劣化があまり進行していないことが確認されたことから、500 サイクル以降は残りの供試体数を考慮して 800, 860 サイクルで測定を行った。

図－２～４に質量減少率、相対密度、相対動弾性係数を示す。ここで、質量減少率および相対密度は、凍結融解試験前の気中質量、密度を基準とした各測定サイクルでの気中質量、密度の割合である。

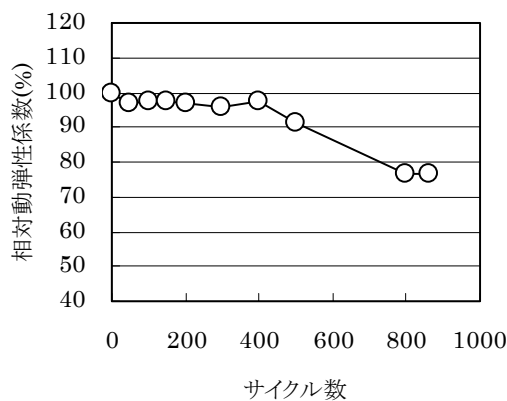
質量減少率は、凍結融解サイクルの進行に伴い徐々に増加し、最終的には約 8%まで達する。これは表面のスケーリング部分を除去している



図－２ 質量減少率

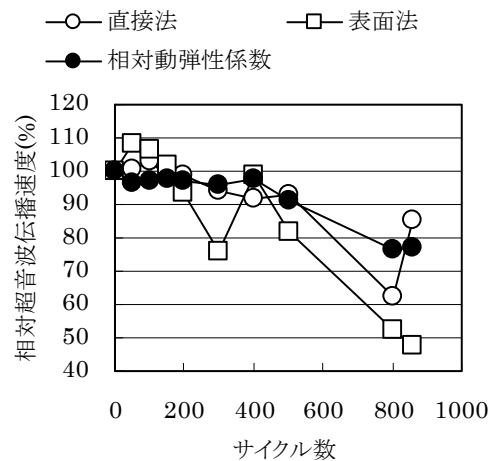


図－３ 相対密度



図－４ 相対動弾性係数

からであるが、最終測定サイクルにおいても供試体が崩壊することはなかった。相対密度は、凍結融解サイクルに関わりなく、ほぼ一定の値となっている。このことから、スケーリング部分を除去した残存部の密度は、ほとんど変化していないことがわかる。相対動弾性係数は、凍結融解サイクルの進行に伴い徐々に減少していくが、500 サイクルまでは緩やかな減少であり、



図－５ 縦断方向の相対超音波伝播速度

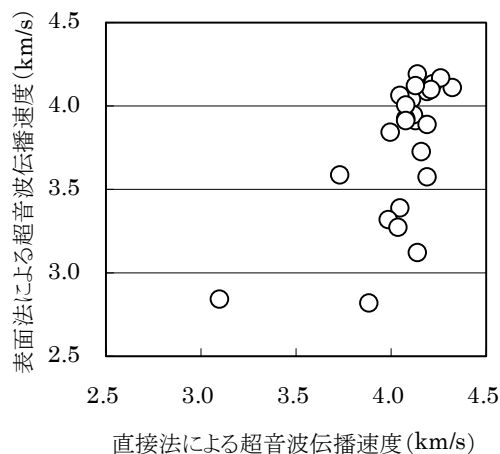
800 サイクル以降でも 80%をやや下回る 77%であることから、表－３に示したコンクリートの基本的物性を踏まえても、今回の凍結融解試験に供したコンクリートは十分な耐凍結融解性を有していることがわかる。

3.2 縦断方向の直接法および表面法による耐凍結融解性の評価

凍結融解試験に供した角柱供試体の縦断方向における直接法および表面法から求められる相対超音波伝播速度を相対動弾性係数とあわせて図－５に示す。

縦断方向の直接法および表面法による相対超音波伝播速度は、相対動弾性係数よりも小さくなるが、500 サイクルまでの直接法による相対超音波伝播速度は相対動弾性係数と傾向がよく近似していることがわかる。一方、表面法による相対超音波伝播速度は、超音波の伝播経路の中に含まれる表面の劣化部が直接法よりも多くなることから、直接法よりも小さくなる。また、測定サイクルによっては、表面の劣化部の影響のために特異な値も見受けられるが、凍結融解サイクルが進行するとともに低下する傾向は直接法の場合と同様である。

図－６には、縦断方向の直接法および表面法による超音波伝播速度の関係を示している。両者の相関係数は 0.74 であり、ある程度の相関性はあることから、表面法による相対超音波伝播



図－６ 縦断方向の直接法および表面法による超音波伝播速度の関係

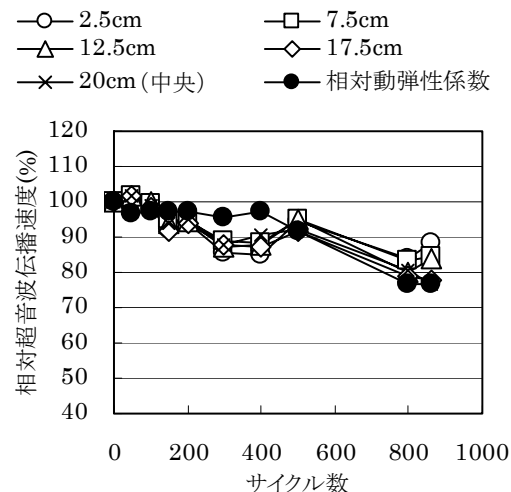
速度でも耐凍結融解性を評価できることが示唆される。

このように、相対超音波伝播速度は、相対動弾性係数と同様に凍結融解作用による劣化を評価することは可能であるが、超音波の伝播が表面の劣化部の状態に影響されることから、特に表面法による相対超音波伝播速度では、相対動弾性係数よりも劣化を敏感に捉えることに留意して耐凍結融解性の評価を行う必要がある。

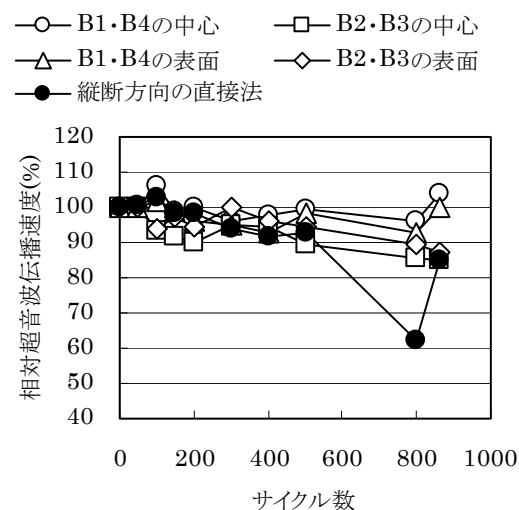
3.3 横断方向の直接法による耐凍結融解性の評価

凍結融解試験に供した角柱供試体の横断方向における直接法から求められる相対超音波伝播速度を相対動弾性係数とあわせて図－７に示す。横断方向では、供試体の長さ方向において端部から2.5cm間隔で9箇所の測定を行っているが、図中では、供試体の中央である端部からの距離20cmを除き、端部からの長さが等しい2箇所の測定値を平均して示している。

横断方向の直接法による相対超音波伝播速度は、供試体の長さ方向の位置において違いが見られないことから、今回の凍結融解試験に供した供試体の内部はほぼ均一に劣化していることがわかる。また、横断方向の直接法による相対超音波伝播速度は、相対動弾性係数とよく近似しており、図－５に示した縦断方向の直接法お



図－７ 横断方向の直接法による相対超音波伝播速度



図－８ 分割ブロックの直接法による相対超音波伝播速度

よび表面法による相対超音波伝播速度よりもその近似性は高いことがわかる。このことから、隅角部がスケーリングにより欠落したコンクリートにおいては、横断方向での超音波伝播速度の測定により、耐凍結融解性の評価が十分可能であることがわかる。

3.4 分割ブロックの直接法による相対超音波伝播速度

凍結融解試験に供した角柱供試体を長さ方向に10cm間隔で4分割したB1～B4の分割ブロックにおける直接法から求められる相対超音波伝播速度を縦断方向の直接法による相対超音波伝

播速度とあわせて図－8に示す。各分割ブロックでは、2.5cm 間隔の9箇所の格子点で直接法による相対超音波伝播速度を求めているが、図中では、端部からの長さが等しいB1とB4、B2とB3に分けて整理するとともに、分割ブロックの格子点をブロック中心（図－1の格子点番号5）とブロック表面（図－1の格子点番号1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9の平均値）に分けて整理している。

供試体の長さ方向の端部に位置するB1・B4は、中心および表面の両者とも相対超音波伝播速度の低下は小さい。一方、供試体の長さ方向の中央に位置するB2・B3は、B1・B4よりも相対超音波伝播速度の低下が大きく、縦断方向の直接法による相対超音波伝播速度と近似する。

図－7の結果からは、供試体の長さ方向においてほぼ均一に劣化していると考えられたが、これは供試体の横断方向で超音波伝播速度を測定した場合である。各分割ブロックの超音波伝播速度は、供試体の縦断方向で測定している。端部に位置するB1・B4では、各測定サイクルにおいて切断面を除く5面で表面のスケーリング部分の除去を行っており、測定面の一方になる端面でも表面の除去を行っている。初期値となる凍結融解試験前の超音波伝播速度を見てみると、B1・B4の中心が3.97 km/s、表面が4.04km/s、B2・B3の中心が4.36km/s、表面が4.31km/sであり、供試体作製時の締固め等の影響により供試体の中央に向かうほど大きくなっている。端部に位置するB1・B4では、初期値を測定した際の端面が各測定サイクルで除去されており、相対超音波伝播速度の算定に用いた初期値が各測定サイクルで測定した場所の初期値よりも小さいために、凍結融解作用の進行とともに超音波伝播速度が低下したとしても、相対値である相対超音波伝播速度の低下は小さくなったと考えられる。一方、中央に位置するB2・B3では、測定面が切断面になることで、端部に位置するB1・B4で起こる初期値の問題が生じないことから、凍結融解作用による劣化を的確に捉えることができ、縦断方向の直接法による相対超音波伝播

速度と近似する傾向を示したと考えられる。

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) 縦断方向の直接法による相対超音波伝播速度は、相対動弾性係数とよく近似するが、超音波の伝播が表面の劣化部の状態に影響されることから、相対動弾性係数よりも劣化に敏感に捉える。
- (2) 縦断方向の表面法による相対超音波伝播速度は、縦断方向の直接法による相対超音波伝播速度よりも小さくなるが、両者の相関性はある程度あることから、表面法による相対超音波伝播速度でも耐凍結融解性を評価できると考えられる。
- (3) 横断方向の直接法による相対超音波伝播速度と相対動弾性係数はよく近似しており、隅角部がスケーリングしたコンクリートにおいては、横断方向での超音波伝播速度の測定により耐凍結融解性の評価を行うことが十分可能である。
- (4) 縦断方向の直接法による相対超音波伝播速度は、特に供試体中央部の相対超音波伝播速度と近似する。

謝辞：本研究は、平成18年度科学研究費補助金（基盤研究(B)，課題番号18380143）により行われたことを付記する。

参考文献

- 1) 緒方英彦ほか：超音波法によるコンクリートの耐凍結融解性の評価，コンクリート工学年次論文集 Vol.24, pp.1563-1568, 2002
- 2) 高田龍一ほか：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，コンクリート工学年次論文集 Vol.26, pp.1911-1916, 2004
- 3) 魚本健人：コンクリート構造物の検査・診断－非破壊検査ガイドブック－，理工図書，pp.117-118, 2003