

## 論文 超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価

緒方 英彦<sup>\*1</sup>・服部 九二雄<sup>\*2</sup>・高田 龍一<sup>\*3</sup>・野中 資博<sup>\*4</sup>

**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、また任意のサイズや形状のコンクリート試験体に対しても適用することができる。そこで、超音波伝播速度 2.0~4.7km/s、動弾性係数 7.0~41.5GPa の範囲における 288 個のデータを用いて、超音波伝播速度と動弾性係数の関係式を導き、超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価に関する検討を行った。その結果、耐凍結融解特性の評価は、相対超音波伝播速度並びに得られた関係式を用いて超音波伝播速度から評価した動弾性係数の相対値でも精度よく行えることが明らかになった。

**キーワード**：超音波法、超音波伝播速度、動弾性係数、耐凍結融解特性、非破壊試験

### 1. はじめに

コンクリートの耐凍結融解特性を検討する凍結融解試験 (JSCE-G 501-1999) では、その評価に相対動弾性係数と質量減少率が用いられる。ここで、相対動弾性係数を測定するために行われる共鳴振動による動弾性係数測定試験 (JIS A 1127-1993) は、多大な労力と時間を必要とし、また任意のサイズや形状の試験体に適用することができない等の制約がある。一方、実際のコンクリート構造物における耐凍害性の照査を相対動弾性係数で行うためには<sup>1)</sup>、試験の性格上構造体から採取したコアが必要となる。しかし、構造体から数多くのコアを採取することは、構造体の耐久性や機能性を確保する上でも不適當であることから、非破壊試験による照査方法を別途確立する必要がある。

これまでに著者らは、非破壊試験によるコンクリートの品質評価に関する研究を行い、その成果の一つとして超音波伝播速度と動弾性係数の間には線形関係が存在することを明らかにした<sup>2)</sup>。しかし、検討を行ったのは、超音波伝播速度 3.5~4.4km/s、動弾性係数 19.2~36.8GPa の範囲における 54 個のデータであり、より広い強度領域に適合する両者の関係式を導く必要性が残された。

超音波伝播速度の測定は、動弾性係数測定試験よりも簡便であり、また任意のサイズや形状の試験体に対しても適用できるだけでなく、実際のコンクリート構造物への適用性も高い。そこで、耐凍結融解特性が低下する低強度領域のデータを含めた超音波伝播速度 2.0~4.7km/s、動弾性係数 7.0~41.5GPa の広い強度領域における 288 個のデータから超音波伝播速度と動弾性係数の関係式を導き、得られた関係式を用いて耐凍結融解特性の評価を行う方法について検討した。

### 2. 超音波伝播速度による動弾性係数の評価

#### 2.1 超音波伝播速度と動弾性係数の関係

超音波伝播速度と動弾性係数の関係式の評価は、表—1 に示す 14 種類の示方配合で作製したコンクリート供試体を表—2 に示す養生方法でそれぞれ養生し、各試験日で測定したデータを用いて行った。表—2 には、供試体形状と本数もあわせて示している。288 個のデータから得た超音波伝播速度と動弾性係数の関係は、図—1 に示すとおりであり、このときの関係式は式 (1) のようになる。

$$Ed = 4.0387VL^2 - 14.438VL + 20.708 \quad |R| = 0.990 \quad (1)$$

\* 1 鳥取大学講師 農学部生物資源環境学科 博 (農) (正会員)

\* 2 鳥取大学教授 農学部生物資源環境学科 農博 (正会員)

\* 3 松江工業高等専門学校助教授 土木工学科 農博 (正会員)

\* 4 島根大学教授 生物資源科学部地域開発科学科 農博 (正会員)

表一 実験に用いた供試体コンクリートの示方配合

No.	最大骨材寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
						水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
1	20	12 ± 2	2.0	55.0	45.0	174	316	824	1009	—
2	20	12 ± 2	2.0	55.0	45.0	200	364	759	952	—
3	20	12 ± 2	4.0	55.0	45.0	188	342	759	949	0.229
4	20	12 ± 2	6.0	55.0	45.0	174	316	762	952	0.411
5	20	12 ± 2	6.0	55.0	45.0	176	320	757	949	0.411
6	20	12 ± 2	8.0	55.0	45.6	172	313	752	918	0.618
7	15	12 ± 2	2.5	55.0	48.8	220	400	793	838	—
8	15	12 ± 2	2.5	55.0	48.8	110	200	1013	1069	—
9	20	12 ± 2	2.0	55.0	48.2	206	374	819	914	—
10	20	12 ± 2	2.0	55.0	53.8	206	374	819	731	—
11	20	12 ± 2	2.0	55.0	50.8	206	374	819	822	—
12	20	12 ± 2	2.0	55.0	45.8	206	374	819	1005	—
13	20	12 ± 2	2.0	55.0	43.7	206	374	819	1096	—
14	20	12 ± 2	2.0	55.0	42.2	206	375	718	985	—

\*セメントは普通ポルトランドセメントを使用, No.14 は、フライアッシュをセメント量の内割りで10%, クリンカーアッシュを細骨材量の内割りで10%混入

表二 実験に用いた供試体の養生方法, 形状, 本数, 試験日

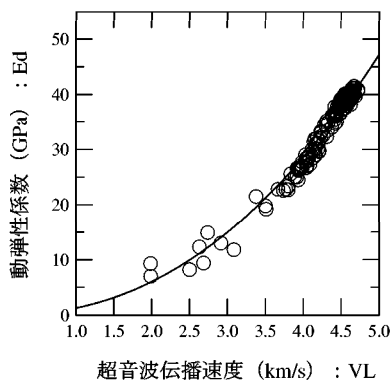
示方配合番号	養生方法番号	供試体形状	本数	試験日
1	No.1	角柱	15	材齢 7, 14, 28 日
2	No.1	角柱	21	材齢 7, 14, 28 日
3	No.1	角柱	24	材齢 7, 14, 28 日
4	No.1	角柱	15	材齢 7, 14, 28 日
5	No.1	角柱	6	材齢 7, 14, 28 日
6	No.1	角柱	15	材齢 7, 14, 28 日
7	No.1	角柱	21	材齢 7, 14, 28 日
8	No.1	角柱	31	材齢 7, 14, 28 日
9	No.1	円柱	3	材齢 3, 7, 14, 28, 56 日
	No.2	角柱	6	材齢 < 1年 : 1ヶ月毎, 1年 ≤ 材齢 ≤ 2年 : 2ヶ月毎
	No.2	円柱	6	材齢 < 1年 : 1ヶ月毎, 1年 ≤ 材齢 ≤ 2年 : 2ヶ月毎
10	No.1	円柱	3	材齢 3, 7, 14, 28, 56 日
11	No.1	円柱	3	材齢 3, 7, 14, 28, 56 日
12	No.1	円柱	3	材齢 3, 7, 14, 28, 56 日
13	No.1	円柱	3	材齢 3, 7, 14, 28, 56 日
14	No.3	角柱	6	凍結融解試験での各サイクル

\*養生方法=No.1: 恒温水槽内で標準水中養生, No.2: リーチング後の排水中に浸漬<sup>3)</sup>, No.3: 材齢 28 日までは標準水中養生, それ以降は凍結融解試験

\*供試体形状=角柱 (100mm × 100mm × 400mm), 円柱 (φ100mm × 200mm)

(超音波伝播速度: 2.0~4.7km/s, 動弾性係数: 7.0~41.5GPa, データ数: 288)

$E_d$ : 動弾性係数 (GPa),  $VL$ : 超音波伝播速度 (km/s)



図一 超音波伝播速度と動弾性係数の関係

一方, 著者らが過去に導いた超音波伝播速度と動弾性係数の関係式は式(2)であり, このときに用いたデータは示方配合 No.1~8 で作製した供試体のものである<sup>2)</sup>。

$$E_d = 19.8542VL - 51.6757 \quad |R| = 0.967 \quad (2)$$

(超音波伝播速度: 3.5~4.4km/s, 動弾性係数: 19.2~36.8GPa, データ数: 54)

両者の式から, ある程度強度が発現している状態では, 超音波伝播速度と動弾性係数の関係を線形としても差し支えないが, 低強度領域を加えた広い強度領域においては, 二次曲線として評価しなければならないことが明らかとなった。

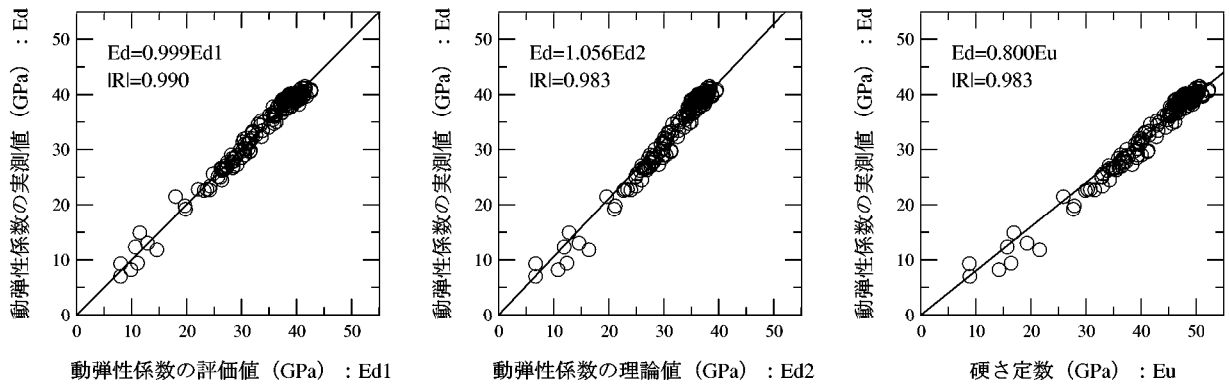
## 2.2 各種評価方法による動弾性係数の評価

次に, 得られた超音波伝播速度と動弾性係数の関係式の有効性と実用性を検証するために, 超音波伝播速度を用いた動弾性係数の理論式と硬さ定数による動弾性係数の評価を行い, 3つの評価結果を比較検討した。

超音波伝播速度を用いた動弾性係数の理論式を式(3)に示す<sup>4)</sup>。

$$E_d = \frac{\rho \cdot VL^2}{g} \cdot \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{1 - \nu} \quad (3)$$

$E_d$ : 動弾性係数 (kgf/cm<sup>2</sup>, 1kgf/cm<sup>2</sup>=9.80665 × 10<sup>-5</sup>GPa),  $VL$ : 超音波伝播速度 (cm/s),  $\rho$ :



図一2 各種評価方法による動弾性係数の評価結果

コンクリートの密度 ( $\text{kg}/\text{cm}^3$ ),  $g$ : 重力加速度 ( $980\text{cm}/\text{s}^2$ ),  $\nu$ : ポアソン比

Nwokoye は、式 (4) に示す密度と超音波伝播速度の平方値の積で表される硬さ定数 (stiffness constant) が動弾性係数と密接な関係があるとし、コンクリートに限らず種々の材料においてもこの関係が成立することを報告している<sup>5)</sup>。

$$Eu = \rho \cdot VL^2 \quad (4)$$

$Eu$ : 硬さ定数 (GPa),  $VL$ : 超音波伝播速度 ( $\text{km}/\text{s}$ ),  $\rho$ : コンクリートの密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

実測の超音波伝播速度を用いて式 (1) から評価した動弾性係数を  $Ed1$  とし、実測の超音波伝播速度と密度、ポアソン比を 0.3 として式 (3) から評価した動弾性係数を  $Ed2$ , そして式 (4) から求められる硬さ定数  $Eu$  と実測の動弾性係数の関係を図一2 に示す。

$Ed1$  は、実測の超音波伝播速度と動弾性係数の関係式である式 (1) を用いていることから、当然の如く線形係数は 1 に近い値となる。 $Ed2$  は、実測の動弾性係数との線形係数が 1.056 であり、若干小さめの評価になるが、理論式の精度の良さを示す結果となっている。一方、硬さ定数と実測の動弾性係数の線形係数は 0.800 であり、硬さ定数を用いた場合は動弾性係数をかなり大きめに評価することがわかる。しかしながら、硬さ定数と動弾性係数の間には、線形関係が成立していることから、別途硬さ定数をパラメータとした関係式を用いることで動弾性係数を評価することができる。これは、理論式との比較からもわかるように、別式をかいして重力加速度やポアソン比の影響を硬さ定数に加味することを

意味する。今回の実験結果から得られる硬さ定数を用いた動弾性係数の評価式を式 (5) に示す。

$$Ed = 0.800Eu \quad (|R| = 0.983) \quad (5)$$

理論式である式 (3) では、超音波伝播速度以外に密度とポアソン比をパラメータとしていることから、評価値の精度を向上するためには、これらの適切な把握が別途必要となる。また、硬さ定数を用いた式 (5) でも、密度の適切な把握が別途必要となる。一方、提案実験式である式 (1) は、超音波伝播速度以外の項目の測定が不要であり、またその評価精度もかなり高いことから、動弾性係数を評価する上で有効かつ実用的な方法であることが今回の比較検討から明らかとなった。但し、現時点における提案実験式の適用範囲は、実験式を得るために用いたデータの強度範囲内においてであり、更なる実験式の一般化を図るためには、低強度及び高強度領域のデータをより多く追加する必要がある。

### 3. 超音波伝播速度を用いた凍結融解試験結果の評価

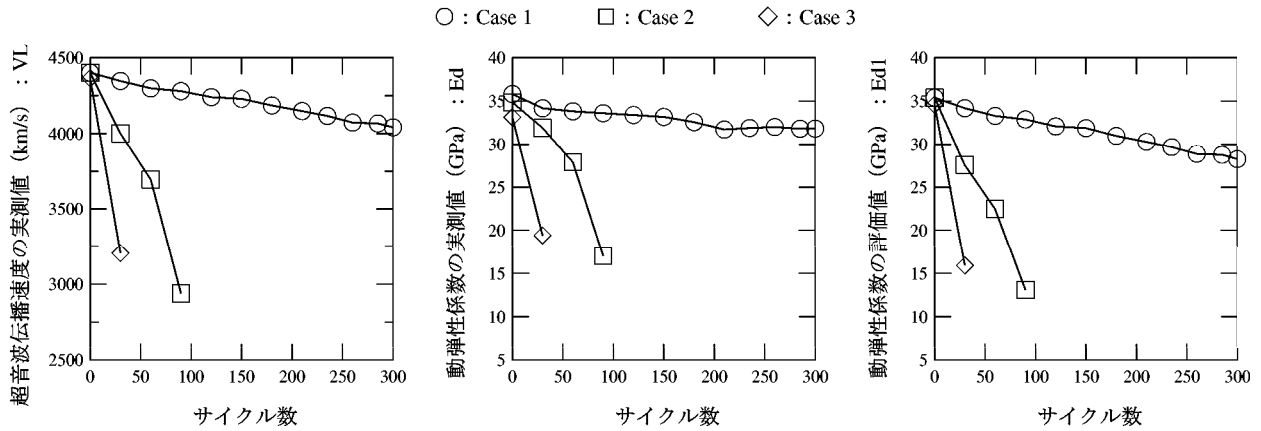
式 (1) に示した超音波伝播速度と動弾性係数の関係を踏まえ、凍結融解試験結果の評価を超音波伝播速度で行った結果について示す。今回実施した凍結融解試験は気中凍結水中融解試験であり、試験に用いた供試体は耐凍結融解特性が低下する過程が検証できるようにコンクリート配合を設定して作製した。

#### 3.1 凍結融解試験の概要

凍結融解試験用に作製した供試体コンクリートの示方配合を表一3 に示し、使用材料の物理的性質を表一4 に示す。セメントは普通ポルトラン

表—3 凍結融解試験に用いた供試体コンクリートの示方配合

セメント	最大骨材 寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
						水	セメント	細骨材	粗骨材
普通	20	12 ± 2	2.0	55.0	48.2	206	374	819	914



図—3 凍結融解試験における各サイクルの超音波伝播速度と動弾性係数

ドセメント（密度：3.16g/cm<sup>3</sup>），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，水は水道水を使用した。

表—4 骨材の物理的性質

	山砂	碎石	F.A.	C.A.
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.59	2.69	2.25	1.94
粗粒率	2.75	7.41	—	—
吸水率 (%)	2.67	1.26	—	4.36

\* F.A. : フライアッシュ

\* C.A. : クリンカーアッシュ

作製したコンクリート供試体は Case 1～Case 3 の 3 種類であり，耐凍結融解特性が低下する過程が検証できるように Case 1 はフライアッシュをセメント量の内割りで 10%，Case 2 は 20%，Case 3 は 30%それぞれ混入している。また，Case 1～Case 3 には，クリンカーアッシュも細骨材量の内割りで 10%混入している。3 種類の供試体は，材齢 14 日まで標準水中養生を行い，その後凍結融解試験を行った。供試体本数は，3 種類とも 3 本である。

### 3.2 凍結融解試験結果

各サイクルにおける超音波伝播速度と動弾性係数の実測値，実測の超音波伝播速度を用いて式 (1) から評価した動弾性係数を図—3 に示す。図中では，3 種類とも 3 本の供試体の平均値を示している。

まず，Case 1～Case 3 の供試体における劣化状況であるが，Case 3 の供試体は 30 サイクルで

スケーリングやポップアウトが見られ，60 サイクルで完全に崩壊した。Case 2 の供試体は，90 サイクルでスケーリングやポップアウトが見られ，120 サイクルで完全に崩壊した。Case 1 の供試体は，300 サイクルまでスケーリングやポップアウトは全く見られず継続的に実験を行うことができた。

式 (1) を用いて実測の超音波伝播速度から評価した動弾性係数 Ed1 は，特に強度が低くなる場合に実測の動弾性係数 Ed よりも若干小さい値になる。しかし，全体的にはよく一致しており，提案実験式である式 (1) の有効性を示す結果となっている。

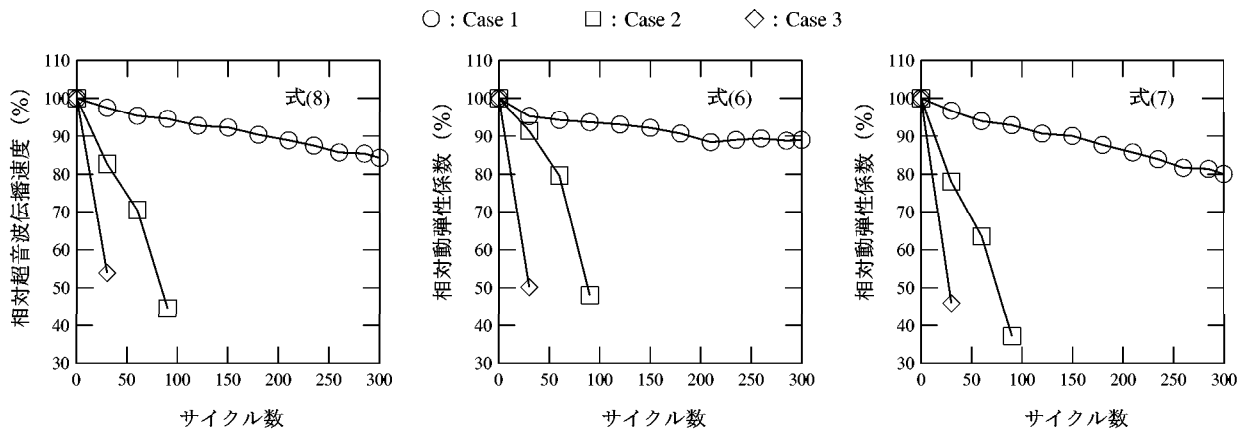
### 3.3 凍結融解試験結果の評価

コンクリートの凍結融解試験方法 (JSCE-G 501 1999) では，式 (6) に示すように相対動弾性係数をたわみ振動による一次共鳴振動数の平方値で評価している。

$$\text{相対動弾性係数 (\%)} = \frac{f_n^2}{f_0^2} \times 100 \quad (6)$$

$f_n$  : サイクル数  $n$  のたわみ振動の一次共鳴振動数 (Hz)， $f_0$  : 凍結融解試験の開始前に測定したたわみ振動の一次共鳴振動数 (Hz)

これは，共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数試験方法 (JIS A 1127-1993) において，動弾性係数の評価式にたわみ振動の一次共鳴振動数の平方値が乗じられており，評価式における他のパラメータが凍結融解試験の各サイクル



図—4 凍結融解試験における各サイクルの相対超音波伝播速度と相対動弾性係数

において同一であるとする、結果的に動弾性係数の相対値はたわみ振動の一次共鳴振動数の平方値の相対値になるからである。

一方、式(1)を用いて実測の超音波伝播速度から評価した動弾性係数を用いて凍結融解試験結果を評価する場合は、評価した動弾性係数自体の相対値を用いる必要があることから、式(7)のようになる。

$$\text{相対動弾性係数 (\%)} = \frac{Ed_n}{Ed_0} \times 100 \quad (7)$$

$Ed_n$  : 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 (GPa),  $Ed_0$  : 凍結融解試験の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 (GPa)

また、実測の超音波伝播速度から直接凍結融解試験結果を評価する場合は、式(1)、式(3)、式(4)からもわかるように、動弾性係数は超音波伝播速度の平方値との関わりが大きいことから、式(8)に示すように平方値を用いる必要がある。

$$\text{相対超音波伝播速度 (\%)} = \frac{VL_n^2}{VL_0^2} \times 100 \quad (8)$$

$VL_n$  : サイクル数  $n$  の超音波伝播速度 (km/s),  $VL_0$  : 凍結融解試験の開始前に測定した超音波伝播速度 (km/s)

式(6)、式(7)、式(8)から求めた各サイクルにおける相対超音波伝播速度と相対動弾性係数を図—4に示す。

式(7)から求めた相対動弾性係数は、式(6)から求めた相対動弾性係数よりも若干小さめの評価になるが、全体的な傾向はよく一致している。相対動弾性係数の過大評価は、耐凍結融解特性

を安全側に見積もることにつながることから、若干の過大評価は許容内であると判断できる。この結果から、提案実験式である式(1)と式(7)による耐凍結融解特性の評価の有効性を確認することができた。

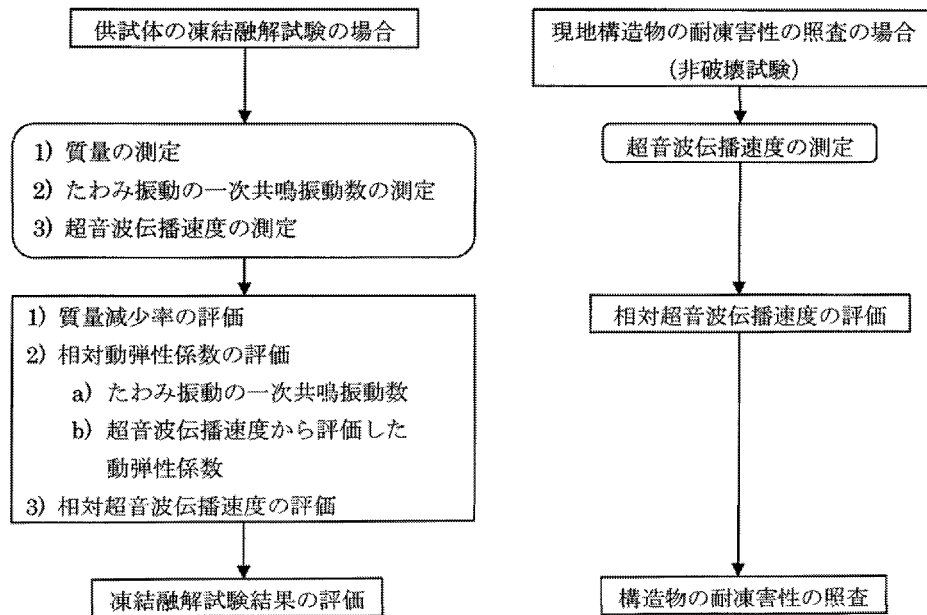
一方、式(8)から求めた相対超音波伝播速度は、式(6)から求めた相対動弾性係数とよく一致しており、実測した超音波伝播速度を直接用いても十分に耐凍結融解特性の評価が行えることを示す結果となっている。

#### 4. 超音波伝播速度を用いたコンクリートの耐凍結融解特性の評価方法

超音波伝播速度を用いたコンクリートの耐凍結融解特性の評価方法をコンクリート供試体の凍結融解試験の場合と現地コンクリート構造物の耐凍害性の照査の場合に分けて図—5のように提案する。

コンクリート供試体による凍結融解試験においては、1) 質量減少率と2).a) たわみ振動による一次共鳴振動数を用いた相対動弾性係数が既に評価項目として基準化されている。本文では、この2項目に加えて、2).b) 超音波伝播速度を式(1)に代入し、得られた動弾性係数を用いて式(7)の相対動弾性係数から評価する方法、3) 超音波伝播速度を用いて式(8)の相対超音波伝播速度から評価する方法の2項目を新たに加えることを提案する。

前章までに示したように、共鳴振動による動弾性係数測定試験を行わずとも超音波伝播速度を用いることで、耐凍結融解特性の評価は可能



図—5 超音波伝播速度を用いたコンクリートの耐凍結融解特性の評価方法

である。しかしながら、試験装置の有無や供試体の状況によっては、超音波伝播速度が測定できない場合も想像できることから、今回は複数評価項目の一つとして超音波伝播速度の利用性を示すのみとする。

一方、現地コンクリート構造物の耐凍害性の照査においては、超音波伝播速度を用いて式(8)の相対超音波伝播速度から評価する方法を提案する。このように現地コンクリート構造物においては、非破壊試験である超音波法を適用することで、コア試験を行わずとも耐凍害性の照査を行うことができる。ここで、新規コンクリート構造物においては、施工完了後の初期値を測定することで経時的な耐凍害性の照査を行うことができるが、既設コンクリート構造物において初期値がない場合は、施工完了後からの経時的な耐凍害性の照査を行うことができない。この場合は、凍害が表面、特に端部から起こることを踏まえ、凍害が起こる可能性が低いと考えられる雨、雪、地下水などに接していない部材面のできるだけ端部から離れた位置（部材の中央位置）における測定値を基準値にして、各部材位置における測定値との相対値をとり、定時的な耐凍害性の照査をまず行う。その後は、初回照査で測定した基準値を用いて経時的な照査

を行うことにする。ここで、超音波伝播速度の測定値は、コンクリートの密度や含水率にも大きく影響されることから、測定位置の選定においてはこのことも踏まえる必要がある。

## 5. まとめ

本研究から得られた成果を以下に示す。

- 1) 超音波伝播速度と動弾性係数の間には、式(1)が成立する。
- 2) 耐凍結融解特性の評価は、式(1)を用いて超音波伝播速度から評価した動弾性係数の相対値で行うことができる。
- 3) 耐凍結融解特性の評価は、式(8)に示す相対超音波伝播速度で行うことができる。
- 4) 超音波伝播速度を用いたコンクリートの耐凍結融解特性の評価は、図—5に示す方法で行うことができる。

## 参考文献

- 1) 土木学会：平成11年版コンクリート標準示方書〔施工編〕—耐久性照査型—, pp.14-15, 2000
- 2) 服部九二雄ほか：各種非破壊試験方法間の相違—非破壊試験方法によるコンクリート強度の推定(1)—, 農土論集, No.164, pp.33-40, 1993.4
- 3) 緒方英彦ほか：塩類集積圃場の排水に浸漬したコンクリートの耐久性, 平成12年度農土学会大会講演会, pp.496-497, 2000.8
- 4) 日本建築学会：コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル, pp.37-41, 1983
- 5) Nwokoye, D.N. : Prediction and Assessment of Concrete Properties from Pulse-Velocity Tests, Magazine of Concrete Research, Vol.25, No.82, pp.39-46, 1973