

# 論文 凍結融解劣化コンクリートの弾性波法による損傷度評価

野口 翔\*1・磯田 俊郎\*2・後藤 尚貴\*3・大津 政康\*4

**要旨:** 弾性波法はコンクリートの非破壊試験に用いられている。凍結融解試験方法で人工的に劣化させたコンクリート供試体を用いて、弾性波法による損傷度評価の比較を行った。例えば、動弾性係数を算定する手法に共鳴法があるが、ポアソン比を無視した一次元部材の近似式より求められるため、一軸圧縮試験により求められる静弾性係数とは異なるとされている。そこで、縦波速度を測定し動弾性係数を求め、静弾性係数との比較を行った。さらに、AE法による損傷度評価を含めて相対損傷度の検討を行った。さらに、共鳴法と三次元BEM解析により得られた共振周波数と変形モードに関する考察を行った。

**キーワード:** 動弾性係数, 共鳴法, 縦波速度, 三次元BEM解析, AEレートプロセス解析

## 1. 序論

凍結融解試験でのコンクリートの損傷度は、経時的な材質変化を表す指標とされており、共鳴法により求められる。その試験方法や計算式などの詳細はコンクリート標準示方書 (JIS A 1127-2001)<sup>1)</sup>に記載されており、一次共振周波数から伝播速度を決定し、一次元部材の近似式から動弾性係数が求められる。しかし、その評価式では、ポアソン比が無視されている。したがって、実際には三次元下における現象を一次元理論に基づき動弾性係数を決定している点に問題があると考えられる。

本研究では、凍結融解試験方法 (JIS A 1148-2001)<sup>2)</sup>に基づき、人工的に劣化させた供試体を作製し、共鳴法を適用した。また、コンクリート中を伝播する縦波速度を測定し、三次元弾性体での縦波速度の定義式を用いて、ポアソン比を考慮した場合での動弾性係数を求めた。これに対し、一軸圧縮試験より求めた静弾性係数と比較しその低下程度について考察した。さらに、手法の有効性を確認するために、共鳴法と三次元BEM解析により得られた周波数スペクトルを比較し、共振周波数に対する供試体の変形モードに関する考察を行った。一軸圧縮試験中にAE(アコースティック・エミッション)計測を導入し、AE発生挙動を近似するAEレートプロセス解析<sup>3)</sup>により得られたパラメータおよび既往の研究で提案されているAEデータベース<sup>3)</sup>を用いて健全時弾性係数を推定した。

これらの結果を比較し、弾性波法による損傷度評価についての考察を行った。

## 2. 相対損傷度の評価

### 2.1 動弾性係数の算出方法

共鳴法縦振動において、伝播速度  $V_1$  を共振周波数  $f$  で除して、式(1)より波長が導かれる。

$$\lambda = V_1 / f_1 \quad (1)$$

$\lambda$ : 波長(m),  $V_1$ : 伝播速度(m/s),  $f_1$ : 縦振動1次共振周波数(Hz)

共振現象は縦振動の振動モードが波長と一致するために生じるので、波長と供試体の振動モードの代表長さ  $L$  との対応から伝播速度は決定される。縦振動では、式(2)のようになる。

$$V_1 = 2Lf_1 \quad (2)$$

この伝播速度から動弾性係数  $E_{D1}$  を決定するため、以下に示すポアソン比が無視された一次元部材の近似式が用いられる。

$$V_1 = \sqrt{E_{D1} / \rho} \quad (3)$$

$E_{D1}$ : 縦振動による動弾性係数(GPa),  $\rho$ : 供試体密度(kg/m<sup>3</sup>)

部材そのものは三次元物体であり、実際の周波数応答は三次元物体の振動挙動を反映した結果であるため、式(4)に示すポアソン比の影響を考慮した三次元弾性体での縦波速度の定義式<sup>4)</sup>を用いることにより、動弾性係数  $E_d$  は推定できる。

$$V_p = \sqrt{E_d(1-\nu) / \{\rho(1-2\nu)(1+\nu)\}} \quad (4)$$

$E_d$ : 縦波速度による動弾性係数(GPa),  $\nu$ : ポアソン比,  $V_p$ : 弾性波の波速測定試験による縦波速度(m/s)

共鳴法によるたわみ振動の1次共振周波数から、コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>に記載されている式(5)よりたわみ振動による動弾性係数  $E_{D2}$  は算出される。

\*1 熊本大学大学院 自然科学研究科社会環境工学専攻 (正会員)

\*2 熊本大学大学院 自然科学研究科社会環境工学専攻 (非会員)

\*3 熊本大学 工学部環境システム工学科 (非会員)

\*4 熊本大学大学院 自然科学研究科教授 工博 (正会員)

$$E_{D2} = 9.47 \times 10^{-4} \frac{L^3 T}{bt^3} m f_2^2 \quad (5)$$

$E_{D2}$ : たわみ振動による動弾性係数(GPa),  $L$ : 供試体長さ(mm),  $T$ : 修正係数(動ポアソン比  $\mu_D=0.2$ ),  $bt$ : 角柱供試体の幅および厚さ(mm),  $m$ : 供試体の質量(kg),  $f_2$ : たわみ振動の1次共振周波数(Hz)

静弾性係数に関して, 一軸圧縮試験によって得られる応力-ひずみの関係を図-1に表す。動弾性係数との比較のために, 原点での接線勾配として初期接線弾性係数  $E_0$  を定義する。応力-ひずみ曲線を以下の式で近似する。

$$\sigma = a_1 \varepsilon + a_2 \varepsilon^\alpha \quad (6)$$

ここで,  $a_1$ ,  $a_2$  および  $\alpha$  はそれぞれ実験定数であり, 応力とひずみの実験値の重回帰分析により求める。

式(6)において,

$$\left. \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=0} = E_0 = a_1 \quad (7)$$

となり, 初期接線弾性係数  $E_0$  の算出が可能になる。

また, ひずみが  $5 \times 10^{-5}$  の点 A と圧縮強度の 1/3 の点 B を結んだ直線の勾配として割線弾性係数  $E_1$  も求めた。

$$E_1 = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \quad (8)$$

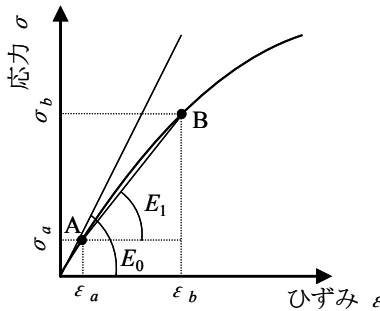


図-1 静弾性係数の算出

## 2.2 AE レートプロセス解析<sup>3)</sup>

AE の発生総数を  $N$ , 応力レベル  $V$  の AE 発生確率関数を  $f(V)$  とすると, 応力レベル  $V$  から  $V+dV$  への応力増分に対し, 式(9)を得る。

$$f(V)dV = dN/N \quad (9)$$

式(9)で得た AE 発生確率関数  $f(V)$  に対し, 損傷度の定量化のために次のような双曲線関数を仮定する。

$$f(V) = a/V + b \quad (10)$$

ここで,  $a$  および  $b$  は定数である。

式(9), (10)より応力レベル  $V$  に対する AE 発生総数  $N$  の関係は以下のように決定できる。

$$N = CV^a \exp(bV) \quad (11)$$

ここで,  $C$  は積分定数である。

材料の損傷度を表す損傷変数  $\Omega$  は, 弾性係数の相対的

変化として以下の式で定義される。

$$\Omega = 1 - \frac{E}{E^*} \quad (12)$$

$E$ : 損傷した材料の弾性係数,  $E^*$ : 健全時の弾性係数

損傷変数  $\Omega$  と一軸圧縮下でのひずみとの関係を以下のように仮定する。

$$\Omega = \Omega_0 + A_0 \varepsilon^\lambda \quad (13)$$

$\Omega_0$ : 初期損傷度,  $A_0$  および  $\lambda$ : 材料固有の定数

式(12), (13)および, 応力ひずみの関係より以下の式が導出でき, その関係を図-2に表す。ここで, 図中の  $\sigma_c$  は最大応力であり,  $\varepsilon_c$  を最大ひずみとして表す。

$$\sigma = E_0 \varepsilon - E^* A_0 \varepsilon^{\lambda+1} \quad (14)$$

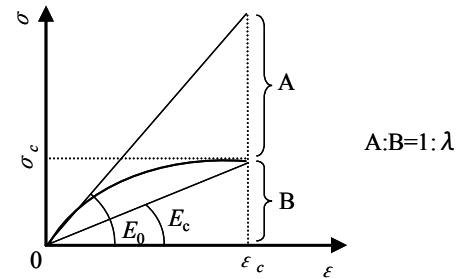


図-2 応力-ひずみの関係

式(14)および図-2より, 以下の二式が得られる。

$$\frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} = E_0 - E^* A_0 \varepsilon_c^\lambda = E_c \quad (15)$$

$$\left. \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=\varepsilon_c} = E_0 - (\lambda+1)E^* A_0 \varepsilon_c^\lambda = 0 \quad (16)$$

式(15), (16)より以下の式で  $\lambda$  を求めることができる。

$$\lambda = \frac{E_c}{E_0 - E_c} \quad (17)$$

ここで, 初期損傷度  $\Omega_0$  を求める際に, 健全時の弾性係数  $E^*$  が必要となるが, 本研究では式(17)により求められる  $\lambda$  値と AE レートプロセス解析値  $a$  値を用いることで, 健全時弾性係数  $E^*$  を AE 計測から推定する手法を用いている。 $a$  値と  $\lambda$  値の関係を図-3に示す。この図は既往の研究で提案されている AE データベース<sup>4)</sup>を用いた相関図である。

図-3中の近似式より, 以下の式を得る。

$$\log_e(\lambda) = aX + Y \quad (18)$$

ここで,  $E_0=E^*$  のとき,  $\Omega_0=0$ ,  $a=0$  と仮定すると, 式(18)より以下の式(19)が得られ, 健全時弾性係数  $E^*$  の推定が AE レートプロセス解析により可能となる。

$$E^* = E_c + \frac{E_c}{e^Y} \quad (19)$$

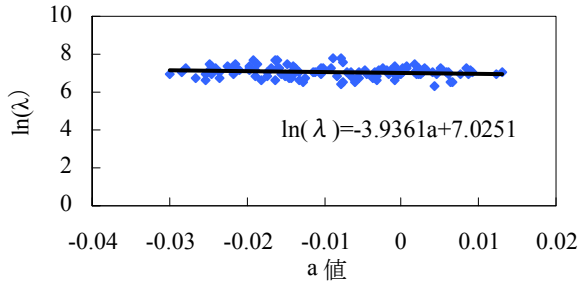


図-3 a 値と λ 値の関係

### 2.3 相対損傷度

本研究では、それぞれの試験により得られた指標による相対損傷度の検討を行った。以下に、ここで用いた相対損傷度評価式を示す。

(1)共鳴法による相対損傷度

$$P_{Xn} = \left[ \frac{f_{Xn}^2}{f_{X0}^2} \right] \times 100 \quad (20)$$

$P_{Xn}$ : 凍結融解  $n$  サイクル後の縦振動( $X=1$ ), たわみ振動( $X=2$ )による相対動弾性係数 (%)

$f_{Xn}$ : 凍結融解  $n$  サイクル後の縦振動( $X=1$ ), たわみ振動( $X=2$ )の 1 次共振周波数 (Hz)

$f_{X0}$ : 凍結融解 0 サイクルでの縦振動( $X=1$ ), たわみ振動( $X=2$ )の 1 次共振周波数(Hz)

(2)縦波速度  $V_p$  による相対損傷度

$$V_n = \left[ \frac{V_{pn}^2}{V_{p0}^2} \right] \times 100 \quad (21)$$

$V_n$ : 凍結融解  $n$  サイクル後の縦波速度による相対動弾性係数 (%)

$V_{pn}$ : 凍結融解  $n$  サイクル後の縦波速度 (m/s)

$V_{p0}$ : 凍結融解 0 サイクルでの縦波速度 (m/s)

(3)初期接線弾性係数  $E_0$  による相対損傷度

$$E_n = \left[ \frac{E_{0n}}{E_{00}} \right] \times 100 \quad (22)$$

$E_n$ : 初期接線弾性係数を用いて求めた相対弾性係数 (%)

$E_{0n}$ : 凍結融解  $n$  サイクル後の初期接線弾性係数 (GPa)

$E_{00}$ : 凍結融解0サイクルでの初期接線弾性係数 (GPa)

(4)推定弾性係数  $E^*$  による相対損傷度

$$E'_n = \left[ \frac{E_{0n}}{E_n^*} \right] \times 100 \quad (23)$$

$E'_n$ : 相対損傷度 (%)

$E_{0n}$ : 凍結融解  $n$  サイクル後の初期接線弾性係数 (GPa)

$E_n^*$ : 凍結融解  $n$  サイクル後の推定弾性係数 (GPa)

## 3. 実験概要

### 3.1 供試体

本研究で用いた供試体の配合条件を表-1 に示す。寸法  $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$  の角柱供試体を 9 本作成した。セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。使用した骨材の品質として、表乾密度は、粗骨材で  $3.07 \text{g/cm}^3$ 、細骨材で  $2.63 \text{g/cm}^3$  であり、吸水率は、粗骨材で  $0.46\%$ 、細骨材で  $2.08\%$  であった。また、混和剤として山宗化学社製 AE 剤 ヴィンソル 70 を使用した。

水中凍結融解試験中の水和反応の影響を少なくするため一年間水中養生を行った後、水中凍結融解試験を 450 サイクルまで行い、50 サイクル毎に共鳴法試験、および縦波速度測定試験を実施し、150 サイクル毎に 3 本の供試体について、長さ  $200 \text{mm}$  に 2 等分した後、一軸圧縮試験および AE 測定を実施した。

### 3.2 弾性波法試験

共鳴法試験は、PC オートスキャン型動ヤング率測定器を用いて、図-4 のように縦振動およびたわみ振動での周波数スペクトルを測定した。

発振器より一定電圧の周波数を  $500 \text{Hz} \sim 20,000 \text{Hz}$  まで正弦波形式のスイープモード信号で発振センサを介して供試体に弾性波を発生させた。受信センサで検出した波形は、スペクトル振幅をデジタル出力させることにより一次共振周波数を求めた。

式(4)より動弾性係数  $E_d$  を求める際に必要となる弾性波速度 (縦波速度  $V_p$ ) の測定試験は、超音波非破壊試験器で透過法により測定を行った。図-5 に示すように、供試体の一端から探触子により発振し、他端で探触子により受振するまでの伝達時間を測定し弾性波の速度を求めた。

### 3.3 AE 計測システム

一軸圧縮試験時に AE 計測を実施した。供試体中央部分に AE センサ (Physical Acoustics 社製 UT-1000) を 2 個接着し、載荷時での AE の検出に用いた。また、供試体中央部分には表裏に、ひずみゲージを縦方向にそれぞれ 1 枚接着し、弾性係数の測定に用いた。AE 計測条件として、AE センサは広域帯型 (共振周波数: 約  $1 \text{MHz}$ )

表-1 コンクリートの配合設計

最大粒径 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )				AE 剤 (cc)	空気量 (%)	スランプ値 (cm)
			W	C	S	G			
20	55	40	180	327	775	1142	98	4.8	4.7

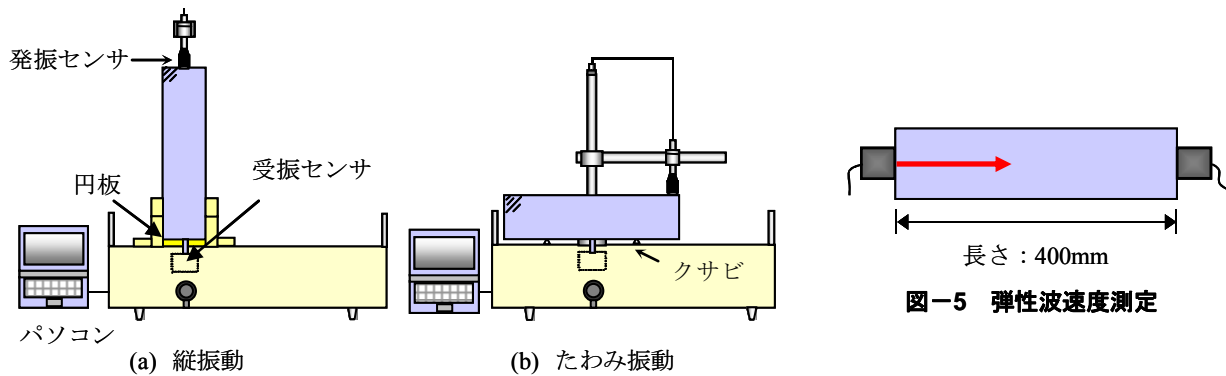


図-4 共鳴法装置

のものを使用し、周波数帯域は 60kHz~1000kHz、AE センサの出力信号はプリアンプ 40dB、メインアンプ 20dB の計 60dB で増幅した。また、AE 計測に際して、しきい値は 42dB、デッドタイム（不感時間）は 2ms とした。

### 3.4 三次元 BEM 解析

三次元 BEM 解析に用いた解析モデルを図-6 に示す。全ての面を 20mm×20mm の要素に区切り、それぞれの要素の中心を節点とした。また、三次元 BEM 解析における力学的特性を表-2 に示す。ここで、動弾性係数  $E_d$ 、縦波速度  $V_p$  および密度  $\rho$  は水中凍結融解試験各サイクル終了後に測定した値を、ポアソン比はコンクリートの標準値である 0.2<sup>5)</sup>を用いた。

解析においては、周波数  $f$  を連続的に 0Hz~20,000Hz まで 5Hz の周波数刻みで変化させることにより、実験における周波数スペクトルの再現を試みた。なお、それぞれの振動での周波数の入出力位置は実験と同位置である。

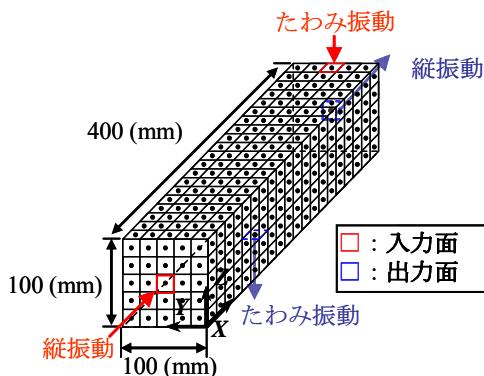


図-6 三次元 BEM 解析モデル

表-2 解析に用いた力学的特性

cycle 数	$E_d$ (GPa)	$V_p$ (m/s)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
0	38.7	4176	2481
150	36.4	4055	2457
300	36.3	4053	2457
450	34.1	3952	2425

## 4. 結果および考察

### 4.1 スペクトル応答

水中凍結融解試験 0 サイクルおよび 450 サイクルでの縦振動、たわみ振動における共鳴法による周波数スペクトルを図-7 に、三次元 BEM 解析による周波数スペクトルを図-8 に示す。また、表-3 は 150 サイクルごとの共鳴法および三次元 BEM 解析による一次共振周波数をまとめたものである。

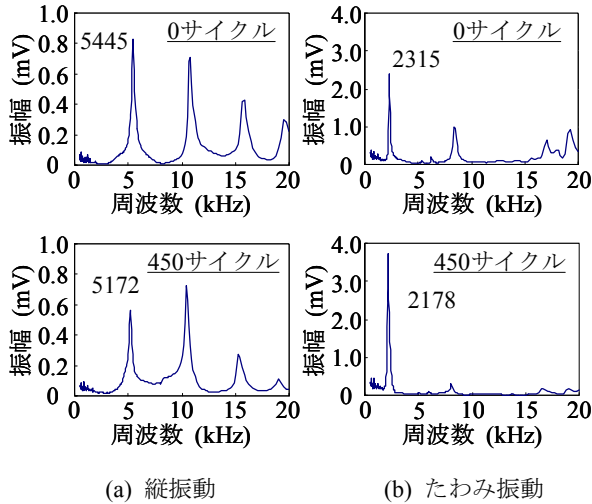
共鳴法においては、縦振動の 0 サイクルにおける一次共振周波数は、5445Hz に、150 サイクルでは 5323Hz、300 サイクルでは 5268Hz、450 サイクルでは 5172Hz に一次共振周波数が確認され、サイクル数を重ねるたびに、凍結融解作用を受け劣化した供試体の一次共振周波数は低下していくことが確認された。また、たわみ振動では、0 サイクルで 2315Hz に、150 サイクルでは 2254Hz、300 サイクルでは 2232Hz、450 サイクルでは 2178Hz に一次共振周波数が確認された。たわみ振動でも縦振動と同様に、サイクル数の増加に伴い一次共振周波数が低下することが確認された。

三次元 BEM 解析と共鳴法による実験結果を比較すると、縦振動において、一次共振周波数は 0 サイクルでは実験結果 5445Hz であるのに対し、三次元 BEM 解析結果では 5410Hz であり、150 サイクルでは 5323Hz に対し 5255Hz、300 サイクルでは 5268Hz に対し 5250Hz、450 サイクルでは 5172Hz に対し 5120Hz と、解析値と実験値はほぼ一致しているといえる。

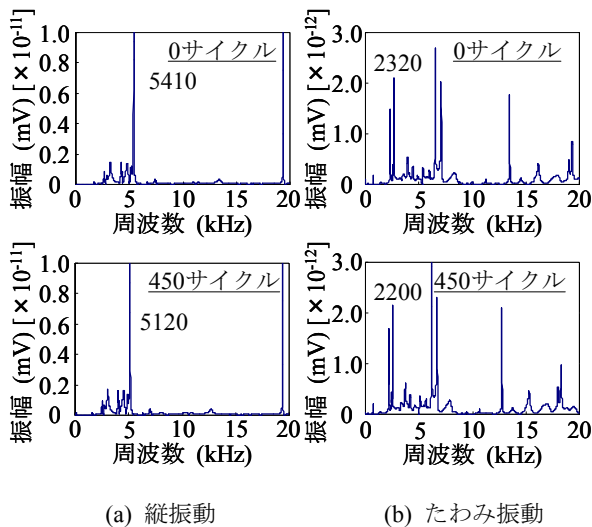
表-3 共鳴法と三次元 BEM 解析における一次共振周波数(Hz)

cycle 数	縦振動		たわみ振動	
	共鳴法	解析	共鳴法	解析
0	5445	5410	2315	2320
150	5323	5255	2254	2255
300	5268	5250	2232	2255
450	5172	5120	2178	2200

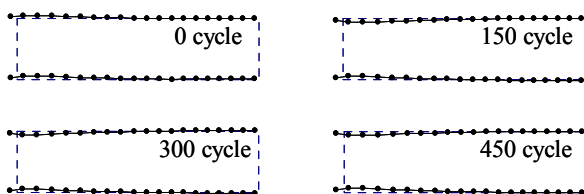
たわみ振動でも縦振動と同様に一次共振周波数の一致が確認された。なお、**図-7**と**図-8**を比較すると、解析では高周波数帯域で実験での共振周波数との相違が見られるが、これは実験と解析で拘束条件が異なることや、要素分割数や周波数刻みが少ないことなど原因と考えられる。



**図-7 共鳴法による周波数スペクトル**



**図-8 三次元 BEM 解析による周波数スペクトル解析**

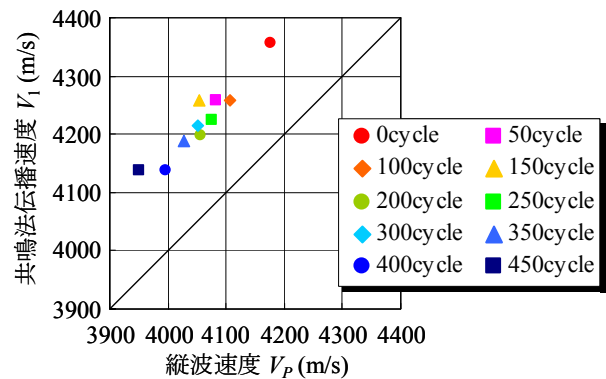


**図-9 三次元 BEM 解析による変形モード解析**

**図-9**に三次元 BEM 解析により得られた縦振動における一次共振周波数に基づく変形モードを示す。入出力点を含み供試体を縦に二等分する面上での要素点の変位を表している。図より縦振動においても、実際には曲げ成分を含んでいることが確認される。このことは、式(3)に基づき一次元部材の近似式で動弾性係数を評価する問題点を明示している。

#### 4.2 波速測定による縦波速度 $V_p$

共鳴法の縦振動により、式(2)を用いて求めた伝播速度  $V_1$  と、波速測定試験より得た  $V_p$  の比較を**図-10**に示す。各サイクルで、 $V_1$ は  $V_p$ よりも150m/sほど速くなっていることが認められる。サイクル数の増加に伴い  $V_1$ と  $V_p$ はともに減少していくことが確認された。これらの減少はサイクル数の増加に伴う供試体の劣化の進行によって、弾性係数が低下したためと考えられる。



**図-10  $V_1$ と  $V_p$ の比較**

#### 4.3 動弾性係数と静弾性係数の比較

共鳴法により得られる伝播速度  $V_1$  から、式(3)を用いて求められた動弾性係数  $E_{D1}$  と、圧縮試験により求められる一般的な静弾性係数である割線弾性係数  $E_1$  とを比較した結果を**図-11(a)**に示す。これにより、 $E_{D1}$ は  $E_1$ に比べ、30%程度大きいことが確認された。これは、 $E_{D1}$ を算出する際にポアソン比を考慮しておらず、一次元部材の近似式を用いていることも影響していると考えられる。そこで、縦波速度より求めた動弾性係数  $E_d$  と、静弾性係数を初期接線弾性係数  $E_0$  として比較した。その結果が**図-11(b)**である。ここで、 $E_d$ の計算に当たり、ポアソン比はコンクリートの標準値<sup>5)</sup>である0.2を用いている。これより、 $E_d$ と  $E_0$ は非常によく一致していることが確認された。よって、動弾性係数と静弾性係数の違いは、求め方による差異が大きく、本来は、同一の物性値であると考えられる。

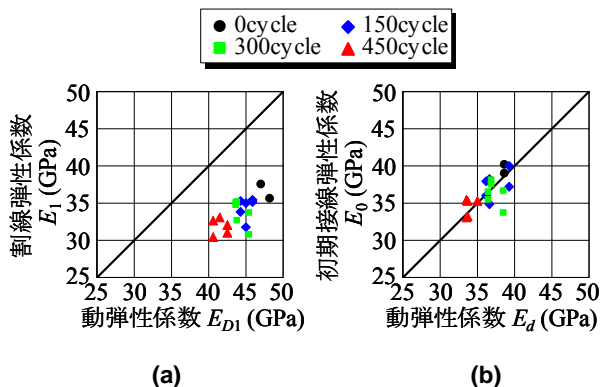


図-11 動弾性係数と静弾性係数の比較

#### 4.4 相対損傷度

式(20)~(23)を用いて、水中凍結融解試験各サイクルにおいて、相対動弾性係数 $P_{1n}$ 、 $P_{2n}$ と相対縦波速度 $V_n$ および相対初期接線弾性係数 $E_n$ 、相対損傷度 $E'_n$ を比較することにより、相対損傷度評価方法の検討を行った。その結果を図-12に示す。 $P_{1n}$ 、 $P_{2n}$ 、 $V_n$ 、および $E_n$ はサイクル数を重ねるごとに徐々に低下し、その低下傾向はほぼ一致していることがわかる。共鳴法による動弾性係数は、図-11からも明らかのように、静弾性係数よりも大きく評価されているが、相対損傷度はほぼ一致することがわかる。

また、 $E_n$ と $E'_n$ は、損傷度の値は完全には一致しないものの、その変化の傾向はほぼ一致していることが確認された。このことより、AE法による推定弾性係数の有効性が認められる。この手法は初期値を必要としないため、実用的には利用価値は高いと考えられる。

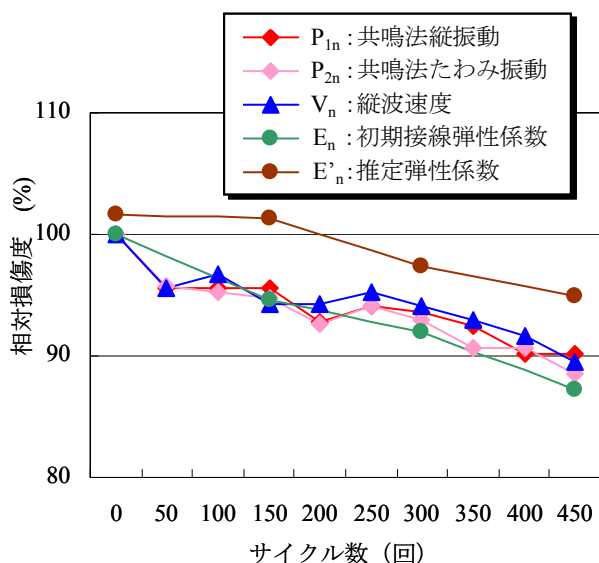


図-12 相対損傷度の比較

#### 5. 結論

本研究では水中凍結融解試験により劣化したコンクリート供試体を用いて、縦波速度からポアソン比を考慮した場合の動弾性係数を求め、一軸圧縮試験より求めた静弾性係数との比較を行った。また、共鳴法と三次元BEM解析により共振周波数を求め、双方の結果を比較し、供試体の変形モードに関する考察を行った。さらに、AEレートプロセス解析を適用することにより、損傷度の定量化について考察を行った。以下に結論を列挙する。

- 1) 三次元 BEM 解析により得られた共振周波数は、共鳴法により得られた共振周波数とほぼ一致することが確認された。また、三次元 BEM 解析による縦振動変形モード解析において、曲げ成分を含んだ振動モードが確認された。
- 2) 共鳴法により得られた共振周波数からの伝播速度  $V_1$  は、弾性波速度測定試験により得られた縦波速度  $V_p$  と比較すると、150m/s ほど速く、サイクル数の増加に伴い  $V_1$  と  $V_p$  は、共に減少していくことが確認された。
- 3) 三次元弾性体の定義式より求めた動弾性係数  $E_d$  と初期接線弾性係数  $E_0$  が、ほぼ一致したことにより、物性値としての弾性係数に、動弾性と静弾性の違いは本来ありえないことが明らかになった。
- 4) 動弾性係数  $E_d$ 、 $E_{D1}$ 、 $E_{D2}$  および初期接線弾性係数  $E_0$  による相対損傷度はほぼ一致することが確認された。また、相対初期接線弾性係数と相対損傷度の変化の傾向がほぼ一致したことにより、AE 法による推定弾性係数の有効性が確認された。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：2002 年制定 コンクリート標準示方書「規準編」 pp.307-311, (JIS A 1127-2001) .
- 2) 土木学会：2002 年制定 コンクリート標準示方書「規準編」 pp.323-327, (JIS A 1148-2001) .
- 3) 鈴木哲也, 池田幸史, 米野現樹, 大津政康：データベース構築に基づく AE レートプロセス解析によるコンクリートの定量的損傷度評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp1791-1796, 2004.
- 4) 日本コンクリート工学協会：平成 14 年度 コンクリート技士研修テキスト 第 7 章 非破壊検査の現況 pp.296, 2002
- 5) 土木学会：2002 年制定 コンクリート標準示方書「舗装編」 pp.21-29, 3.2.5