

# [1] 各種の初期欠陥を有する部材の共振特性

正会員 ○坂田康徳（九州東海大学工学部）

正会員 大津政康（熊本大学工学部）

## 1. まえがき

コンクリート非破壊検査法の1つに共振法があるが、この方法は約20 KHz以下の低周波数領域における弾性波による部材の共振現象を利用した、主に、コンクリートの弾性係数測定のための方法である。一方、筆者等はAE法で用いる装置を主体とする、より広帯域（約1~500 KHz間）を対象とした弾性波フィルター特性による非破壊評価法を検討している。<sup>1)</sup>この両者はコンクリート中を伝播する弾性波を利用した方法として共通点が多い。後者は周波数領域におけるフィルター特性として表わされる支配的ピークの周波数やその振幅、あるいはピーク発生状況等を種々の見地から分析あるいは解析して、その材料の物性（ひび割れ、空隙、強度、劣化度等）の評価を行うものである。本方法では、フィルター特性の指標の1つとして、初期ピーク周波数を測定して評価値とするケースが多い。この値は、低周波数領域において受信センサーが感知した初期の主要な共振点と考えられるので、弾性波による部材の共振現象を理論的に解明しておくことが不可欠である。

本論文では各種の欠陥を有する部材の低周波数領域における共振現象を解明し、本方法と共振法との関係を明らかにしてRC示方書で用いられている動弾性係数算定式の理論的考察を行う。そして、円形欠陥を有する部材、網状ヘアークラックを有する部材、凍結融解試験による劣化過程にある部材等、各種の初期欠陥を有する部材の弾性波フィルター特性とこれらをモデル化した部材の有限要素法（FEM）による解析結果との比較検討を行っている。尚、以後、本方法を仮の名称としてEFCM（Elastic Filter Characteristic Method）と呼ぶものとする。

## 2. EFCM と共振法との関係

図-1は弾性波フィルター特性を測定するための計測システムを示している。本方法の理論的背景および詳細な計測法については既に報告済みである。<sup>2)</sup>これはコンクリート中を伝播する弾性波の挙動を追跡する見地から、共振法との共通点が多い。

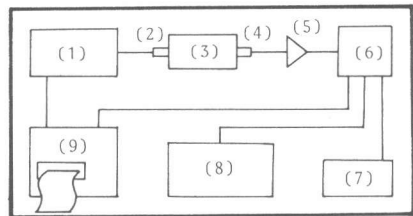
図-2はW/C=50%、スランプ8cmの普通コンクリート円柱形供試体（φ15×30cm）を用いて、周波数領域1~20KHz間における両方法による測定結果の比較である。共振法は（JIS A1127）における縦振動法により、感度の大小を問わず、その供試体の共振周波数を求めた。フィルター特性は周波数変化に対する出力応答を示している。この図より、フィルター特性上に現われるピークと共振法で現われる共振点とは、低周波数側から第1番目のピーク附近ではば一致することが判る。この周波数は共振法における縦振動一次共振周波数であることが確認されている。このように、低周波数領域において、フィルター特性上に現われる強い共振によって生じる初期の主要なピーク周波数を、ここでは初期ピーク周波数F<sub>1</sub>と呼ぶことにする。

## 3. 動弾性係数算定式

現在のRC示方書では、共振法における縦振動の場合の動弾性係数算定式として、次式を与えている。

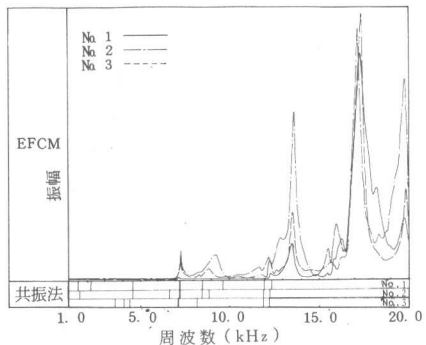
$$E_d = C_1 W f_1^2$$

ここに、 $C_1 = 408 \times 10^{-5} \times L/A$  (1)



- (1)信号発生機 (2)トランスデューサー（入力）
- (3)供試体 (4)トランスデューサー（出力）
- (5)プリアンプ (6)デスクリミネーター
- (7)デジタルマルチメーター (8)オシロスコープ (9)電磁オシログラフ

(図-1) 計測システム図



(図-2) EFCMと共振法の比較

ただし、 $E_d$ は動弾性係数 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )、 $W$ は供試体重量 ( $\text{kgf}$ )、 $f_1$ は縦振動一次共振周波数 ( $\text{Hz}$ )、 $L$ は供試体長さ ( $\text{cm}$ )、 $A$ は供試体断面積 ( $\text{cm}^2$ )である。これは、長さ $L$ に対する横幅 $B$ の比 $L/B$ が非常に大きな細長い部材中を伝播する縦波速度を求める次の一次元弾性波動論から導かれている。

$$v_p = 2 L f_1 = \sqrt{E_d / \rho} \quad (2)$$

ただし、 $v_p$ は縦波速度 ( $\text{cm}/\text{sec}$ )、 $\rho$ は密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )である。これより、 $E_d = 4 \rho L^2 f_1^2$ となる。

一方、コンクリート供試体は、一般に、 $L/B = 2 \sim 5$ 程度の短い部材が多いため、上記のような部材長のみが影響要因として卓越する式では、いろいろと不都合も多いと考えられる。その第1点は同一材料の供試体にて測定された静弾性係数と動弾性係数との格差であり、さらに、第2点は低周波数領域における部材の共振現象の複雑さである。故に、このような短小部材に対しては、本来、横方向の変形を考慮した(すなわち、ポアソン比を導入した)二次元あるいは三次元的取り扱いが必要となってくる。

等方材料における三次元弾性理論に基づく動弾性係数の算定式は縦波速度  $v_p'$  より、次のように求められる。

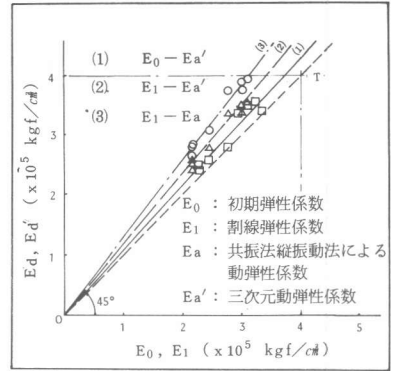
$$v_p' = \sqrt{\frac{(\lambda + 2\mu)}{\rho}} = \sqrt{\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \times \frac{E_d'}{\rho} = 2 L f_1 \quad (3)$$

$$E_d' = \frac{4 \rho (1+\nu)(1-2\nu) L^2 f_1^2}{(1-\nu)} \quad (4)$$

ただし、 $E_d'$ は三次元弾性波動理論に基づく動弾性係数 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )、 $\lambda$ 、 $\mu$ はラメ定数 ( $\text{g}/\text{sec}^2$ )、 $\nu$ はポアソン比である。コンクリートにおける一般的な値として、 $\nu = 0.2$ を与えると、式(4)より  $E_d' = 0.9 \times 4 \rho L^2 f_1^2 = 0.9 E_d$ となる。すなわち、測定値  $f_1$  に対して、三次元式(4)による弾性係数は一次元式(1)におけるそれより約1割程度小さな値として求められることが判る。一般に、式(1)による動弾性係数は静弾性係数より若干大きな値となるケースが多いが、より現実に近づいた式(4)による値は静弾性係数と動弾性係数との格差を縮小し得るものと考えられる。図-3は本実験室で過去に得られた数種のコンクリートより得られた初期弾性係数  $E_0$ 、割線弾性係数  $E_1$  と2つの動弾性係数  $E_d$ 、 $E_d'$ との関係を示したものである。 $E_d$ 対 $E_1$ 、 $E_d'$ 対 $E_1$ 、 $E_d'$ 対 $E_0$ の順に原点を通る対角線  $OT$  に近づいている(すなわち、 $E_d' \div E_0$ となる)様子が判る。

#### 4. 実験および解析の概要

コンクリート部材が有する欠陥は、おおむね、次の2種類である。第1は劣化作用や急速乾燥による微小クラックや気泡あるいは軟石類等が部材全体に一樣に散在するケース、第2はヒビ割れや大空隙あるいは表面欠落が集中的に存在するケースである。第1のケースは本来のコンクリート自体の材料的特質の延長とみなすことができる。一方、第2のケースは前者と異なり、弱点が部分的に集中するが、他の部分は材料的に全く健全である。このような性質の異なる欠陥を有する部材の共振特性を把握し、共振周波数又は動弾性係数の変化から強度や劣化度評価の外に、網状ヘアークラック量や比較的大きなひび割れや空隙の存在あるいはその大きさ等を評価し得る方法が確立されるならば有意義である。そこで、代表的なコンクリートの欠陥として次の3種類を選び、弾性波フィルター特性を測定した。シリーズ1では角柱供試体 ( $15 \times 15 \times 26 \text{ cm}$ )の中央に直径  $\phi = 0 \sim 9 \text{ cm}$ まで  $3 \text{ cm}$ 毎に変化する円形欠陥を設け、供試体軸線方向のフィルター特性を測定した。シリーズ(2)では標準養生材令28日における角柱供試体 ( $10 \times 7.5 \times 40$



(図-3) 静弾性係数  $E_0$ 、 $E_1$  と動弾性係数  $E_d$ 、 $E_d'$  との関係

cm) を約 50℃ の乾燥器中で急速乾燥し、その後、十分乾燥した供試体に湿気を戻して行く過程におけるフィルター特性を測定した。シリーズ(3)では同じく標準養生28日における普通および A E コンクリートの角柱供試体 (10 × 7.5 × 40 cm) の凍結融解過程におけるフィルター特性および共振法 (縦振動法およびタワミ振動法) による相対動弾性係数の測定、並びに供試体重量変化の測定を行った。表-1 は各シリーズに用いたコンクリートの配合条件および特性値を、また、図-4 は各シリーズの供試体寸法および E F C M におけるセンサー取り付け状況を示している。

(表-1) 使用コンクリートの配合条件および特性値

シリーズ	コンクリートの種類	$\phi_{max}^{*1}$ (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C <sup>*2</sup> (%)	S/A <sup>*3</sup> (%)	$\sigma_{28}^{*4}$	$E_0^{*5}$ $\times 10^5$	$E_1^{*6}$ $\times 10^5$
1	Plain	20	8	1.8	50	37	416	3.61	3.44
2	AE	20	8	4.2	50	36	395	3.30	3.10
3	Plain	20	10	1.5	60	38	381	3.41	3.16
	AE	20	10	4.3	60	36	287	3.14	3.03

\*1  $\phi_{max}$ : 粗骨材最大寸法

\*2 W/C: 水セメント比

\*3 S/A: 細骨材率

\*4  $\sigma_{28}$ : 材齢28日圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

\*5  $E_0$ : 初期弾性係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)

\*6  $E_1$ : 割線弾性係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)

F E M による解析は上記の各実験シリーズにおける供試体をモデル化して、次の2種類について二次元共振解析を行った。図-5 は本解析に用いた部材の各寸法、要素分割および支点拘束状況を示している。なお、解析に用いたコンクリートの特性値は一般的な値としてヤング率  $E = 3.0 \times 10^{11}$  (dyne/cm<sup>2</sup>)、密度  $\rho = 2.3$  (g/cm<sup>3</sup>)、ポアソン比  $\nu = 0.2$  を基本値として選び、かつ、コンクリートの劣化状況の変化は  $E$  および  $\nu$  の変化で代表した (表-2 参照)。また、解析では固有値解析を行って、共振周波数を第20次まで求めた。<sup>3)</sup>

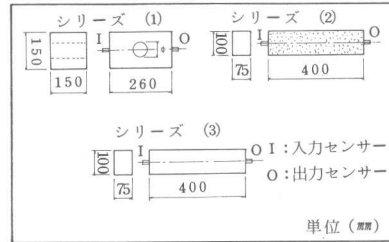
### 5. 結果および考察

図-6 はシリーズ(1)における円形欠陥寸法および材令の変化に伴う  $F_1$  の変化を示している。欠陥寸法の増加と共に  $F_1$  が低下し、また、材令の増加 (従って、強度の増加) と共に  $F_1$  が増加する様子が判る。図中の●印は欠陥寸法変化に対する F E M 解析結果に基づく初期ピーク周波数相当値  $F_1 k$  の変化を示している。欠陥寸法の増加と共に  $F_1 k$  が低下する様子が判る。しかし、その減小度は実験で得られたものと必ずしも一致せず、計算方法になお一層の工夫が必要であるようである。

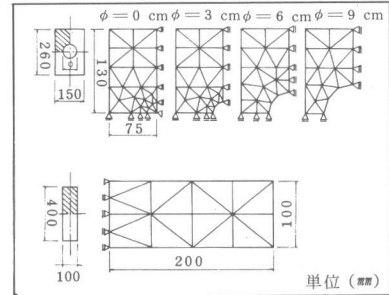
図-7 はシリーズ(2)における急速乾燥による網状ヘアークラック量の増加に伴う  $F_1$  の変化を乾燥前の値に対する百分率で示したものである。乾燥期間の増加と共に  $F_1$  が低下している様子が判る。図中、A-B 曲線は乾燥期間約3ヶ月後において、供試体を水中に浸して湿気を戻して行った場合の  $F_1$  の変化を示している。 $F_1$  がかなり回復して行く様子が判る。これは浸水によって供試体中に水分が行きわたると共に、これまで乾燥によって収縮し、最大限に開いていた大小のクラックが、吸湿と共にセメントペーストの膨張等によってクラック幅を狭められ、水が充填される等により、弾性波の伝達が良くなるためと考えられる。

図-8 はシリーズ(3)における凍結融解試験結果である。E F C M、共振法縦振動法およびタワミ振動法の3方法による各20サイクル毎の相対動弾性係数の変化はほぼ同様の傾向を示し、また、重量変化も劣化に伴って減少している様子が判る。

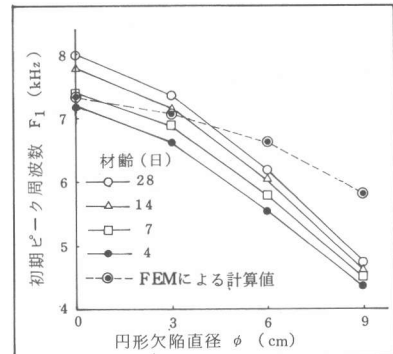
図-9 はシリーズ(1)の円形欠陥の直径  $\phi = 6$  cm の場合に相当する共振解析結果の一例である。低周波数



(図-4) 供試体寸法およびセンサー取り付け図



(図-5) F E M 解析における要素分割および支点拘束状況



(図-6) 欠陥寸法と  $F_1$  および  $F_1 k$  の関係

領域に種々のタイプの共振が多数起っている様子が判る。

表-2は凍結融解作用や急速乾燥等による劣化あるいは網状ヘアークラック増加等に相当する変化を動弾性係数やポアソン比の変化で代表させた場合の式(1)、(4)に基づく一次共振周波数 $f_{1Ed}$ 、 $f_{1Ed'}$ 、FEM解析結果に基づく $F_{1k}$ および凍結融解試験前の普通およびAEコンクリートから得られた実測値 $F_1$ を示している。共振周波数は主にヤング率に支配されるが、ポアソン比の影響もかなり大きいことが判る。

### 6. 結論

(1)、コンクリート部材の動弾性係数の算定は式(1)によるよりも式(4)による方が初期弾性係数に近くなる。

(2)、円形欠陥を有する部材における $F_1$ が欠陥寸法の増加と共に低下する傾向のあることが実験および解析ともに認められた。

(3)、急速乾燥に伴う網状ヘアークラック量の増加と共に $F_1$ は低下するが、水分の補給でかなり回復する。

(4)、凍結融解試験における劣化度評価はEFCM、共振法縦振動法およびタワミ振動法共に同様の傾向を示す。故に、EFCMにより共振法同様に強度推定や劣化度評価が可能である。

(5)、FEM解析による部材の共振解析結果では $F_{1k}$ がEや $\nu$ によって変化し、その傾向は式(4)による値にほぼ等しい。

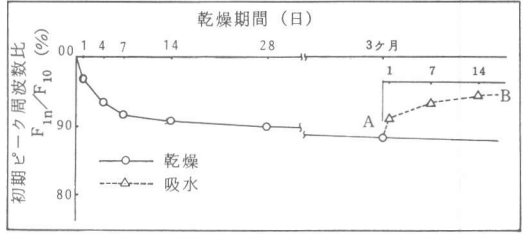
参考文献 (1) 坂田、大津、"超音波フィルター特性によるコンクリート部材の劣化度判定法に関する研究、熊本大学工学部研究報告第33号、第3号、1984、12、PP 9~21

(2) 坂田、大津、"初期ヒビ割れを有するコンクリート部材の超音波フィルター特性、第7回コンクリート学年次講演会論文集1985、PP 9~12

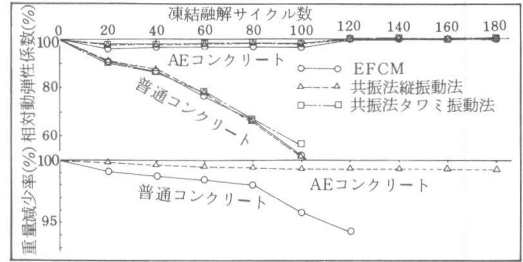
(3) Ohtsu M. and Ono K. "Resonance Analysis of Piezoelectric Transducer Elements," J. of Acoustic Emission, Vol. 2, No 4, 1983, PP 247~260

(表-2) Eおよび $\nu$ の変化に基づく式(1)、(4)、FEMによる共振周波数比較および実験値との関係

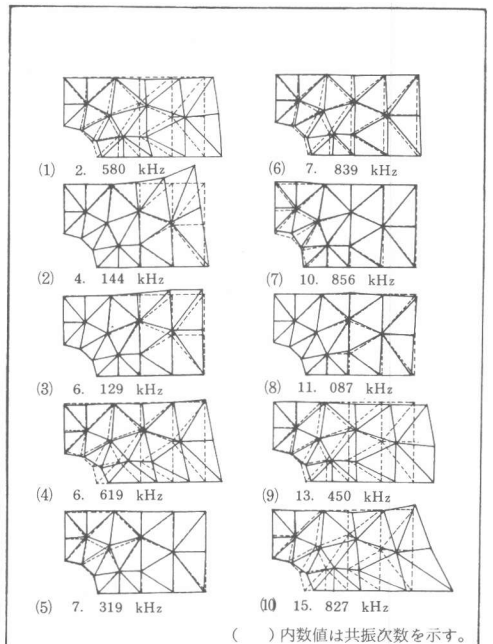
E ( $\text{dyne/cm}^2$ )	$\nu$	Eq.(1)		Eq.(4)		FEM		$F_1$ (kHz)
		$f_{1Ed}$ (kHz)	$f_{1Ed'}$ (kHz)	" (%)	$F_{1k}$ (kHz)	" (%)		
$2.0 \times 10^{11}$	0	3.69						(普通)
" "	0.15		3.79	79.6	4.04	79.8		5.12
" "	0.20		3.88	81.5	4.13	81.6		(AE)
" "	0.25		4.04	84.9	4.22	83.4		4.98
$3.0 \times 10^{11}$	0	4.51						
" "	0.15		4.64	97.5	4.95	97.8		
" "	0.20		4.76	100.0	5.06	100.0		
" "	0.25		4.96	104.2	5.27	104.2		
$4.0 \times 10^{11}$	0	5.21						
" "	0.15		5.36	112.6	5.71	112.8		
" "	0.20		5.49	115.3	5.84	115.4		
" "	0.25		5.71	120.0	6.09	120.3		



(図-7) 急速乾燥に伴う $F_1$ の変化



(図-8) 凍結融解過程における相対動弾性係数および重量の変化



(図-9) FEMによる共振解析結果( $\phi = 6$  cmの場合)