

## 論文

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

坂 田 康 徳\*

大 津 政 康\*\*

Non-destructive Evaluation of Deterioration of Concrete Members  
by Ultrasonic Filter Characteristics

Yasunori SAKATA\*

Masayasu OHTSU\*\*

## 1. 緒 言

近年、材料の強度および機械的性質を非破壊的に検査し、品質の健全性、安全性、構造物の安全性、耐久性、残存寿命等を評価しようとする試みが、主に金属加工を伴う工業製品の生産管理の方面や、現場における施設、構造物の安全運転、又は、安全使用の面から期待され、かつ、実施されている<sup>1)</sup>。

材料の非破壊検査方法<sup>2)</sup>としては放射線透過法、磁粉探傷法、渦流探傷法その他、種々の方法が取られているが、中でも、超音波を用いた方法は、近年の波動理論およびエレクトロニクス関係技術の急激な進歩に伴って急速に発展してきた。例えば、超音波の音速を利用した欠陥探査や部材厚さの測定<sup>3)</sup>、AE法<sup>4)</sup> (Acoustic Emission 法)、超音波の伝達特性(振幅や位相ずれ、減衰度合等)を利用した各種の方法<sup>5)</sup>が提案され、かつ、実施されている。

超音波に関する研究は、音響学の中で、早くから行われていたが、超音波探査法の源泉と考えられる事実は、18世紀末のイタリアの自然哲学者 Lazzario Spollanzani によるコウモリを用いた実験であろう<sup>10)</sup>。彼は、コウモリが暗い空間を超音波を発生しながら、安全に飛び交う事実を、実験によって確めた。それ以来、超音波は音響物理学に携わる多くの自然科学者や物理

学者達によって次第にその性質が明らかにされ、それと共に、これを用いた計測技術も発展した。中でも、第一次大戦における対潜水艦作戦での P. Langevin の活躍は大きく、海中ソナーの開発はその後の各種の超音波試験法の基礎的存在となった。

一方、超音波技術の開発の歴史は結晶体の圧電効果や信号処理に伴う各種の高速度計測、高速度解析等、エレクトロニクス関係技術の開発の歴史でもある。

最近、超音波を用いた工業的非破壊検査法が急速に発展している理由として、R. S. Sharpe の言を要約すると次のようになる<sup>11)</sup>。

- 1) 基本的装置は操作が簡単でポータブル化が可能であり、バッテリー操作で現場作業にも便利である。
- 2) 特に熟練工もいらぬし、X線写真術のような危険性が少ない。
- 3) 多くの材料のどんな厚さにも適用できる。
- 4) 最も興味ある周波数(1~10 MHz)における短波長の超短波を容易に発生させる事ができ、また、短時間に良い精度で欠陥を探知できる。
- 5) 材料中のヒビ割れは、高い音響的不均衡により、超音波反射体として効果的に働く。

ここで、超音波という言葉について述べておく。人間の可聴域がその音波の周波数と関係していることは良く知られており、個人差はあるが、一般的には1 kHz~20 kHz が可聴域とされている。超音波とは、その周波数帯域を越える音域を持つ波の総称である。超音波法と呼ばれる検査法では高周波数の弾性波を用いるため、一般的にそのように呼ばれている。

昭和59年9月29日 受付

\* 九州東海大学工学部 土木工学科 助教授

\*\* 熊本大学工学部 土木工学科 助教授

超音波による材料の非破壊検査は比較的均質な材料として取り扱える金属加工, 冶金工学方面でかなりの進展をみているが, 不均質な材料を取り扱うコンクリート工学では, 材料の複雑さと取り扱いの困難さが附加されて, 今一つ, 進展が阻害されている感がある<sup>12,13)</sup>。しかしながら, 超音波が材料中を伝播して通過する時, 材料中の諸状況(ヒビ割れ, 空隙, 異物混入等)によって, 反射, 回折, 散乱等の諸現象が起り, 通過前と後では波の特性(波形, 周期, 振幅, 位相等)に変化をきたす。すなわち, 材料中を伝播する超音波は材料中の諸情報を豊富に含んだものとして取り出されるので, 受信号波をいろいろな角度から分析し, 又は解析することは多大な意義がある。このような意味において, 近年の傾向として, 単に音の伝播速度のみならず, 振幅や位相ずれ等を含めた多角的探査が行われつつある<sup>9)</sup>。

この研究<sup>14,15)</sup>で用いているフィルター特性の測定は, このような豊富な情報を含む超音波受信号を用いて, 材料中の諸状況を把握することを目的とするもので, 多角的探査法(仮の名称)に含まれるものであると考えられる。具体的にはフィルターという名称のごとく, 振幅一定, 周波数可変の入射波に対する出力波の周波数応答を決定するものである。

超音波に限らず, 全ての波動現象はその波長 $L$ とその径路にある障害物の大きさ $d$ の比 $L/d$ がある値以下になると直進できなくなる。その様な場合に, その障害物が波動に対し不透過型であれば反射され, あるいは迂回し, 又, 透過型でも反射や屈折が起り, 縦波と横波に分離する等で, そのエネルギーを消耗し, 障害物が多いと減衰が激しくなる。特に, コンクリートの場合, その中を伝播する超音波は大小粒の, しかも, 多数の障害物を経験せねばならないので, 高周波数領域の弾性波成分(超音波)は特に減衰が激しいものと考えられる。

Fig. 1は超音波の周波数と波長の関係, コンクリート供試体の形状寸法や骨材, 気泡, セメント粒子等の大きさの分布, および, 周波数領域1~500kHz間のフィルター特性とシステムの出力特性(模式図)の関係を同軸対数目盛上で示したものである。なお, ここでは, コンクリート中の弾性波(縦波)速度を4000(m/sec)と仮定して波長を計算している。これより, フィルター特性に表われるピーク群, 周波数および波長と供試体因子(形状寸法, 骨材や気泡の大きさ等)の相互関係を見る事ができる。このピーク周波数や振幅と試供体因子の関係を明らかにする事が本研究の目的である。

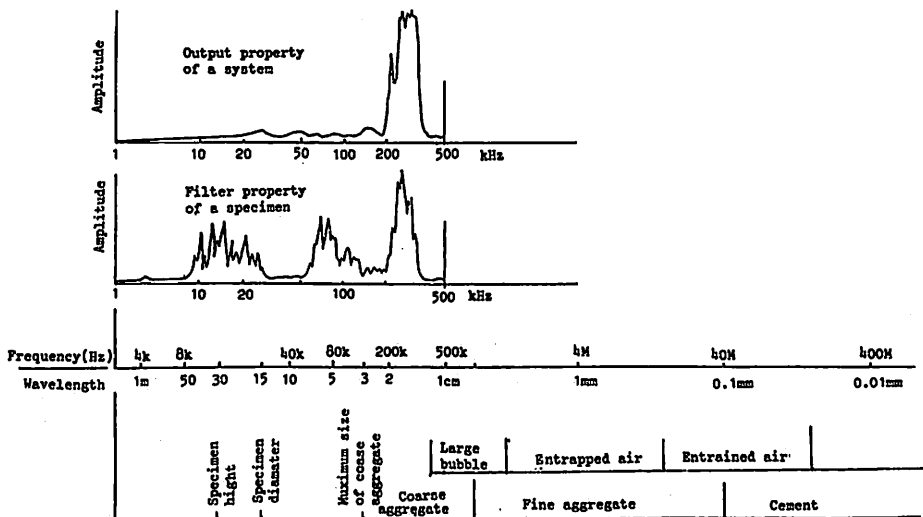
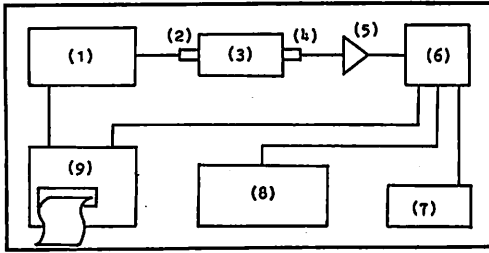


Fig. 1. Schematical relationships between the measured frequency range and wavelengths of materials.

2. 超音波フィルター特性と計測法

ここで用いているコンクリートのフィルター特性を

測定する方法についてのシステム図を Fig. 2 に示す。この方法は, まず, ファンクションジェネレーターより一定電圧(振幅一定)で周波数の変化する sin 波形の電



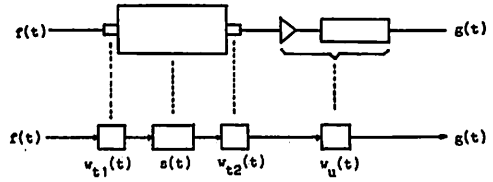
(1) Function-generator, (2) Transducer (input), (3) Specimen, (4) Transducer (output), (5) Pre-amplifier, (6) Discriminator, (7) Digital-multimeter, (8) Oscilloscope, (9) Rapicoder

Fig. 2. A block diagram of measuring system.

気信号を発信センサーを介してコンクリート供試体の一端より送信し、他端の受信センサーにてこれを受け、プリアンプ、ディスクリミネーターによって増幅し、オシロスコープ、デジタルマルチメーター、電磁オシログラフへ分岐して波形を観察、記録する方法である。なお、コンクリート供試体へのセンサー(この場合、AEセンサーを使用している)の取り付けは、瞬間接着剤を用いてアダプターをフラットな供試体端面の中央に取り付けた後、グリースを介してAEセンサーを取り付けた。

ここで、本実験における計測機器は従来の超音波法におけるような装置を用いず、AE計測の際に使用する機器が主要な部分を構成している点に注目されたい。発信部を除けば、全くAE計測システムと同じであり、これより、ひび割れなどの進展の際にはAE計測を行うことも可能である。従来の超音波法の装置を用いなかった理由は、基本的には、さらに広い周波数領域を対象としたためである。

弾性波動の問題<sup>10)</sup>では波動の伝播する系をシステムと称し、Fig. 3に示すように、入力波  $f(t)$  に対し、システムを通過後の出力波を  $g(t)$  とすれば、 $f(t)$  はシステムの変換機能によって  $g(t)$  に変えられて取り出される。この変換機能をフィルター特性と呼ぶ。基本的な考え方は  $f(t)$  に対する  $g(t)$  の相違から、このような変換機能を引き起すシステム内部の状態とその機能の相互関係を解明しようとするものである。本研究では、このシステム特性を周波数領域におけるフィルター特性として取り出し、これに基づいてシステムの状態を評価する。



$f(t)$ : Incident wave  
 $w_{11}(t), w_{12}(t)$ : Transfer function of the transducer  
 $s(t)$ : Transfer function of the specimen  
 $w_u(t)$ : Transfer function of the amplifier and filter unit  
 $g(t)$ : Detected wave

Fig. 3. Transmission path of signal wave.

この過程の理論的考察として線形システム論に従えば、信号の発生から記録までの波動伝播系全体はFig. 3に示す通りであり、これを線形システムで表せば次のようになる。

$$g(t) = f(t) \cdot w_{11}(t) \cdot s(t) \cdot w_{12}(t) \cdot w_u(t) \quad (1)$$

ただし、 $\cdot$  は合成積を表し、また、 $w_{11}(t), s(t), w_{12}(t), w_u(t)$  はそれぞれ、発信センサー、供試体、受信センサー、増幅器や検波器等のシステム関数を表す。今、 $g(t), f(t), w_{11}(t), s(t), w_{12}(t), w_u(t)$  のフーリエ変換を  $G(f), F(f), W_{11}(f), S(f), W_{12}(f), W_u(f)$  と表せば、上式のフーリエ変換による周波数領域での式は次のようになる。

$$G(f) = F(f) \cdot W_{11}(f) \cdot S(f) \cdot W_{12}(f) \cdot W_u(f) \quad (2)$$

ここで、 $S(f)$  は周波数領域でのシステムの特長、すなわち、フィルター特性を表すものである。しかし、波動伝播系全体の応答  $G(f)$  には、システム以外の計測装置固有の特長  $W_{11}(f), W_{12}(f), W_u(f)$  等を含むため、これらを補正する必要がある。そこで、 $S_0(f) = 1$  となるような波動伝播系のモデルを相定する。この系に  $F(f)$  を入力した場合の応答を  $G_0(f)$  とすれば、

$$G_0(f) = F(f) \cdot W_{11}(f) \cdot S_0(f) \cdot W_{12}(f) \cdot W_u(f) \quad (3)$$

となる。故に、式(2)、(3)より

$$\frac{G(f)}{G_0(f)} = \frac{S(f)}{S_0(f)} = S(f) \quad (4)$$

として  $S(f)$  が求まる。

函数  $S(t)$  はシステム特性と呼んだが、弾性波動論に従えば、弾性体に瞬時に力が作用した場合の検出点での変位を与えるものとなる。そのような弾性体を伝わる波の波動方程式は次のような偏微分方程式で表される。

$$c^2 \nabla^2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (5)$$

$$\nabla^2 = \begin{cases} 1 \text{次元の場合} & \frac{\partial^2}{\partial x^2} \\ 2 \text{次元の場合} & \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \\ 3 \text{次元の場合} & \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \end{cases}$$

$c$ : 波速

この方程式の解  $u$  は波動函数と呼ばれ、1次元の場合

$$u = A \exp [i \xi (\pm x \pm ct)] \quad \xi: \text{波数} \quad (6)$$

と与えられる。

今、コンクリート供試体のような部材について、上式を適用する場合、1次元における縦波伝播速度  $c_p$  は

$$c_p^2 = E_d / \rho \quad (7)$$

ただし、 $E_d$ : 動弾性係数(1次元)

$\rho$ : 密度

で与えられる。

ところで、共振法においては、縦振動の場合に長さ  $l$  の部材が半波長  $L/2$  で共振している時の周波数  $f_1$  を測定していることになっているので、1次元の場合の式より、次式が成立する。

$$c_p = Lf = 2lf_1 = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (8)$$

共振法では上式(8)より  $E_d$  を求めている。一方、3次元等方材料における場合の音速は次のようになる。

$$c_p^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \quad (9)$$

$$c_s^2 = \frac{\mu}{\rho} \quad (10)$$

ただし、 $c_p$  は縦波速度、 $c_s$  はせん断波速度、 $\lambda, \mu$  はラメ定数である。この式(9)をポアソン比  $\nu$  を用いて書き改め、式(8)と同様な共振条件を採用すれば、

$$\begin{aligned} c_p &= \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \times \frac{E_d'}{\rho} \\ &= 2lf_1 \end{aligned} \quad (11)$$

となる。ただし、 $E_d'$  は3次元での動弾性係数である。これより、1次元の場合と3次元の場合の動弾性係数  $E_d$  と  $E_d'$  の関係が次のように求められる。

$$\frac{E_d}{E_d'} = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (12)$$

今、仮に  $\nu=0.2$  と仮定すれば、 $E_d=1.11E_d'$  となり、1次元的に求められた従来の共振法における動弾性係数の値は、より実際に近いと考えられる3次元的に求められる動弾性係数の値より若干高い値となっている事に注意されたい。本実験で取り扱ったコンクリートの割線弾性係数  $E$ 、共振法による動弾性係数  $E_d$  (1次元表示)、超音波法による動弾性係数  $E_p$  (1次元表示)、超音波法による3次元表示の動弾性係数  $E_d'$  はそれぞれ Table-1 中に示されている。

### 3. 実験概要

実験は凍結融解試験過程および標準養生過程における共振法と超音波法で得られる動弾性係数の共通性を明らかにする。また、コンクリート供試体の形状寸法や配合条件(骨材寸法、空気量、水セメント比)の変化に伴うフィルター特性の変化を把握する。Table-1に各コンクリートの配合条件、供試体形状寸法、および、硬化コンクリートの諸性質を示す。

#### 実験項目

Series A: 水セメント比、スランプ一定のプレーンおよび AE コンクリートの凍結融解過程における周波数領域 1~20 kHz 間のフィルター特性および共振法による動弾性係数の測定。

Series B: 普通および早強ポルトランドセメント使用の同一水セメント比および同一スランプの両プレーンコンクリートの材令に伴う周波数領域 1~500 kHz 間のフィルター特性の測定と共振法による動弾性係数の測定。

Series C: 同一水セメント比のモルタルおよび AE コンクリートの凍結融解過程における周波数領域 1~500 kHz 間のフィルター特性の測定。

Series D: 同一配合のプレーンコンクリートで直径

Table 1. The mix proportion, specimen size and mechanical properties of the specimens.

Series	Kind	Cement	Specimen size (cm)	$\phi_{max}$ (mm)	Slump (cm) or Flow (mm)	Air (%)	w/c (%)	s/a or (s/c)	w (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{AB}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E \times 10^5$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_d \times 10^5$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_p \times 10^5$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_p \times 10^5$ (kg/cm <sup>2</sup> )
A-1	Plain concrete	Normal	D15×30	15	8 ± 1.5	2.5	55	50	195	357	3.13	3.79	3.66	3.30
2	"	"	10 7.5 40	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
3	AE concrete	"	D15×30	"	"	7.0	"	47	160	301	2.85	3.39	3.26	2.94
4	"	"	10 7.5 40	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
B-1	Plain concrete	"	D15×30	"	"	3.0	"	50	177	398	2.85	3.69	3.50	3.15
2	"	*H.E.S.	"	"	"	3.2	"	50	177	424	3.00	3.80	3.58	3.23
C-1	AE concrete	Normal	10 7.5 40	20	"	2.3	"	50	186	226	2.58	3.18	3.06	2.75
2	Plain mortar	"	"	5	(209)	1.3	"	2.5	291	364	2.29	3.06	2.92	2.63
D-1	"	"	D15×30	15	13.5±1.5	2.8	"	0.50	173.7	388	2.81	"	3.63	3.27
2	"	"	D14.5×40	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
3	"	"	D14.5×50	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
4	"	"	D12.5×30	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
5	"	"	D10×30	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
E-1	Cement paste	"	D15×30	"	(238)	0.5	38	"	543.7	451	1.98	"	2.26	2.04
2	Plain mortar	"	"	5	(209)	3.2	55	(2.5)	292.0	447	2.48	"	3.09	2.78
3	Plain concrete	"	"	15	12 ± 1.5	2.6	"	0.50	171.0	398	3.02	"	3.76	3.39
4	"	"	"	30	"	2.1	"	0.41	168.0	387	3.11	"	3.94	3.55
F-1	Plain mortar	"	"	5	(250)	3.0	"	(2.0)	334.0	429	2.18	"	2.85	2.57
2	AE mortar	"	"	"	(235)	4.0	"	(2.2)	308.9	400	2.16	"	2.77	2.50
3	Cellular mortar	"	"	"	(238)	11.5	"	(2.6)	251.2	224	2.16	"	2.65	2.39
4	Plain concrete	"	"	30	12 ± 1.5	2.1	"	0.41	168.0	387	3.11	"	3.94	3.55
5	AE concrete	"	"	"	"	4.5	"	0.37	152.5	334	3.01	"	3.90	3.51
6	"	"	"	"	"	7	"	0.34	143.0	299	2.78	"	3.75	3.38
G-1	Plain concrete	"	"	"	8 ± 1.5	1.8	45	0.41	165.5	449	3.29	"	4.04	3.64
2	"	"	"	"	"	1.8	55	0.42	165.0	376	3.15	"	3.86	3.48
3	"	"	"	"	"	1.5	65	0.43	164.0	279	2.69	"	3.61	3.25

\*H.E.S. High-early-strength cement  
 $\phi_{max}$  = Maximum size of coarse aggregate.  
 w/c = Water cement ratio.  
 C = Weight of cement per unit volume of concrete.  
 W = Weight of water per unit volume of concrete.  
 $E_p$  = Dynamic Young's modulus by the ultrasonic method.  
 $E_d$  = Three-dimensional dynamic Young's modulus by the ultrasonic method.  
 $E$  = Uniaxial compressive strength.  
 $E_s$  = Secant Young's modulus.  
 $E_d$  = Dynamic Young's modulus by the resonance method.

および高さの異なる円柱形供試体のフィルター特性の測定。

Series E: 骨材寸法の異なるコンクリート, モルタル, セメントペーストのフィルター特性の測定。

Series F: 同一水セメント比で空気量の異なるモルタルおよびコンクリートのフィルター特性の測定。

Series G: 粗骨材最大寸法, スランプ一定で水セメント比の異なるブレンコンクリートのフィルター特性の測定。

使用材料は普通ポルトランドセメント(比重 3.17), 早強ポルトランドセメント(比重 3.13), 粗骨材は球磨川下流産の川砂利(比重 2.67, 吸水率 0.95), 細骨材は同じく球磨川下流産の川砂(比重 2.61, 吸水率 1.87, 粗粒率 3.01), 混和剤はビソゾールである。

供試体は打設後, 標準養生を経て, 所定の材令で各々 3 本ずつ試験し, 各測定値はその平均で示されている。

#### 4. 実験結果および考察

##### 4-1 超音波法と共振法の共通性

超音波フィルター特性による非破壊検査方法は, 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, 共振法と共通点が多い。故に, 周波数領域を共振法と同じく 1~20 kHz 間で測定し, その両者の結果を比較検討してみた。得られた結果の代表例を Fig. 4 に示す。これは A-2 の凍結融解くり返し回数 60 サイクルにおける測定結果の一例である。超音波法の結果は横軸の周波数変化に対する出力電圧(周波数

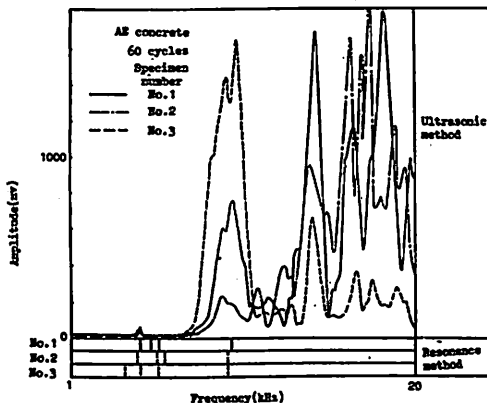


Fig. 4. Comparisons between ultrasonic method and resonance method.

応答)を縦軸に示し, 共振法による共振点の出現状況と共に示した。これより, 超音波法で得られる周波数応答のピーク周波数と共振法による共振点の位置は第 1 番目のピーク附近, 後続の第 2 ピーク附近で大略一致するが, 超音波法による周波数応答のピーク周波数が高周波数部に多く現われるのに対して, 共振法による共振点は感度の大小を含めて低周波数部に多く現れている傾向がある。これは Fig. 5 に示すように, 超音

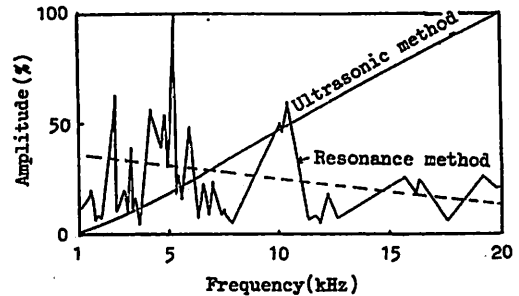


Fig. 5. The frequency response of both systems: Ultrasonic method and resonance method.

波法においては送信センサーと受信センサーを, また, 共振法においては加振器とピックアップを直接接触させた場合の両方法における出力特性が, 周波数変化と共に相当異なることに起因するものと考えられる。図より, 超音波法の場合, 周波数領域 1~20 kHz 間における出力特性がほぼ一定勾配で増加するのに比べて, 共振法では, 測定方法の適否もさることながら, 非常に不規則なものとなり, かつ, 低周波数領域で高く, 高周波数領域で低い傾向にあることが判る。このような計測装置に起因する見掛けの共振点は計測上の問題であり, 共振法による計測で, 計測者が不馴れな際によく見られる誤った共振点の観察とも関係しているであろう。この点は装置として早急に改善すべき点と思われる。

しかしながら, 両方法共, 共振法における 1 次共振周波数  $f_1$  相当の周波数(この周波数を超音波法では初期ピーク周波数と呼び  $F_1$  と記す)附近で供試体の強い共振状態を示す顕著な振幅の増加を生ずることが判る。これは, 本方法でも共振点を利用して動弾性係数の測定が可能である事を示すものである。また, 本方法の場合, 周波数軸上の共振点周辺の前後関係が視覚的に把握できる点も, 単にダイヤルで共振点のみを探す従来の共振法に比べて一歩前進と言える。一つの難点は同一形状寸法の供試体を用いても, 同一周波数に対

するピーク振幅が相当異なることである。これは、センサー取り付け部の粗度や取り付け位置又は取り付けかたの微妙な差違が振幅に影響しているものと考えられる。

4-2 材令に伴うフィルター特性

ここでは、普通および早強ポルトランドセメントを各々使用した同一配合のプレーンコンクリート供試体(φ15cm×30cm)を用いて周波数領域10~500kHz間におけるフィルター特性を検討した。結果より、両コンクリート共、材令4日では100kHz附近以上の高周波数領域におけるピーク群の振幅が全体的に小さく、ピークを示す周波数の上限(本方法の場合、通常の状態すなわち材令約4週、部材厚約30~50cm程度、極端な配合でないコンクリートでは約330kHz程度である。以後、これをピーク周波数上限と呼ぶ)も低いのに比べて、材令が大きくなるに従ってピーク振幅も大きくなり、また、ピーク周波数上限も高くなっていることが判った。これは、材令の増加に伴って、セメント水和物結晶が発達すると共に、骨材への附着やセメント粒子間の緻密な結び付きが粒子間空隙を埋めて進行し、超音波の伝達を良くするためと考えられる。その結果、超音波の伝達速度も速くなり、 $F_1$ が大きくなると考えられるが、それが材令に伴う強度の増加と結び付く事になる。Fig. 6は普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート供試体の周波数領域1~10kHz間におけるフィルター特性を共振法と比較して

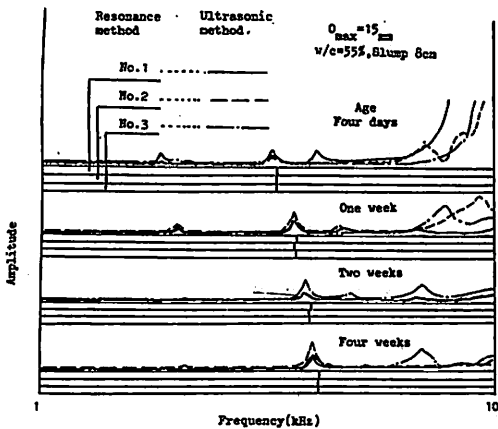


Fig. 6. Comparisons between the results of the resonance method and the ultrasonic method in the plain concrete specimen of normal Portland cement.

示したものである。材令と共に  $F_1$  および  $f_1$  がほぼ同位置で増加していることが判る。この  $F_1$  および  $f_1$  を基に、式(8)より材令に伴う動弾性係数の変化を、材令28日における普通ポルトランドセメント使用のコンクリートの値を基準として百分率で示すと Fig. 7 のようになる。両コンクリート共に  $F_1$  と  $f_1$  による差はほとんどないことが判る。また、Fig. 8は同上の両コンクリートの材令7日および28日における動弾性係数  $E_d$ 、 $E_D$  と一軸圧縮強度  $\sigma_c$  との関係を示したものである。これより、強度のいかにかわからず、 $E_D$  の方が  $E_d$  より若干低い値となる事および  $\sigma_c - E_d$ 、 $\sigma_c - E_D$  の関係はほぼ同一勾配である事が判る。

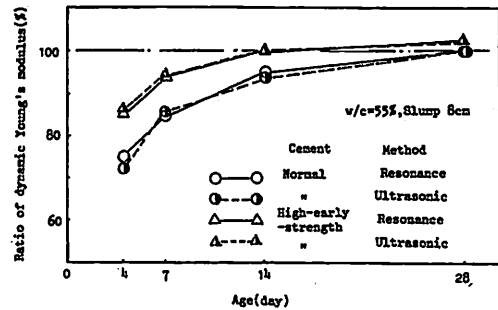


Fig. 7. Variation of ratios of dynamic Young's modulus to Young's modulus of the specimen of normal Portland cement at 28 days.

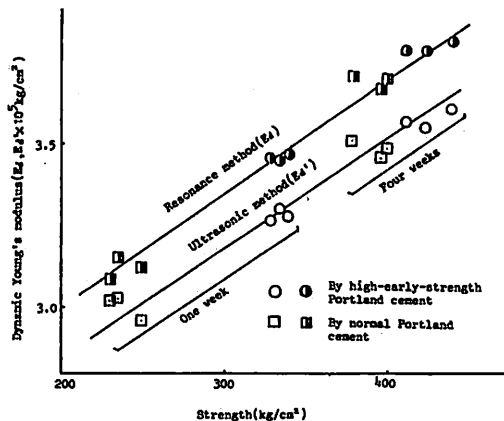


Fig. 8. Relations between dynamic Young's moduli and strengths of the specimens.

## 4-3 供試体形状寸法がフィルター特性に及ぼす影響

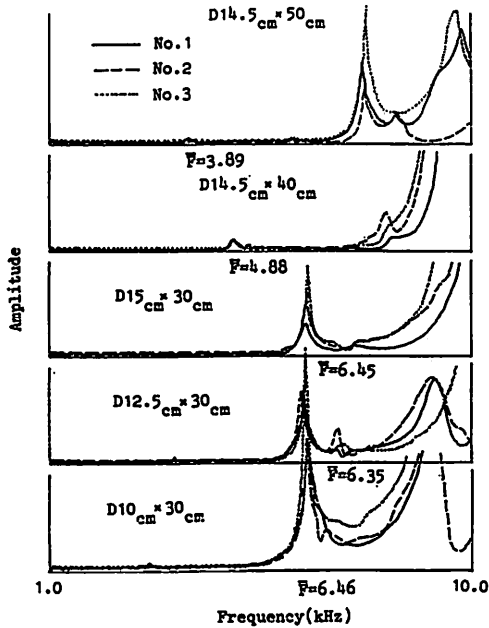


Fig. 9. Variation of filter properties for the specimen size in the frequency range of 1~10kHz.

Fig. 9 は同一配合のプレーンコンクリートを用いて供試体の直径  $D$  および高さ  $H$  を変化させた場合の周波数領域 1~10 kHz 間におけるフィルター特性を示したものである。これより、同一径 ( $D=15\text{cm}$ ) でも、 $H$  が大きくなると初期ピーク周波数 (共振法における一次共振周波数相当値)  $F_1$  は低くなる。これは式 (8) より判るように  $H \times F_1 = \text{一定}$  より当然である。しかし、同時にその初期ピーク振幅が非常に小さくなり、 $H=50\text{cm}$  ではほとんど識別しがたい程になっている。これは測定長さが超音波振幅の減衰に相当影響しているものと考えられる。さらに、高さ一定 ( $H=30\text{cm}$ ) で  $D$  を変化させた場合、 $D$  が小さい方が初期ピーク振幅が大きく、明瞭になっている。これは一次元波動伝播状態に近くなり、1次元モードでの共振状態が顕著になったものと考えられる。また、同上の供試体について周波数領域 50~500 kHz 間のフィルター特性を検討した。その結果、 $H$  が大きくなると全周波数領域においてピーク振幅が小さくなり、特に高周波数領域においてピーク振幅の低下が目立つ事が判った。これは Fig. 9 の結果と同じく、測定部材厚が大きくなると超

音波の減衰が激しくなるものと考えられる。しかし、同一高さの場合の  $D$  の変化に対しては全周波数領域でのピーク振幅の相違は少いようである。さらに、Fig. 10 は同じく同上の供試体における周波数領域 1~100 kHz 間におけるフィルター特性を示したものである。この図の特徴はピーク群が大略 2 つに分れ、その中央部分 (周波数領域約 35~65 kHz 区間) では応答振幅が小さくなっていること、および、約 35 kHz 以下の周波数領域におけるピーク群と約 65 kHz 以上の高周波数領域のピーク群の応答形態が著しく相異なる事である。すなわち、周波数領域約 35 kHz 以下の低周波数領域では先端の著しく尖った凸凹の激しいピーク群で

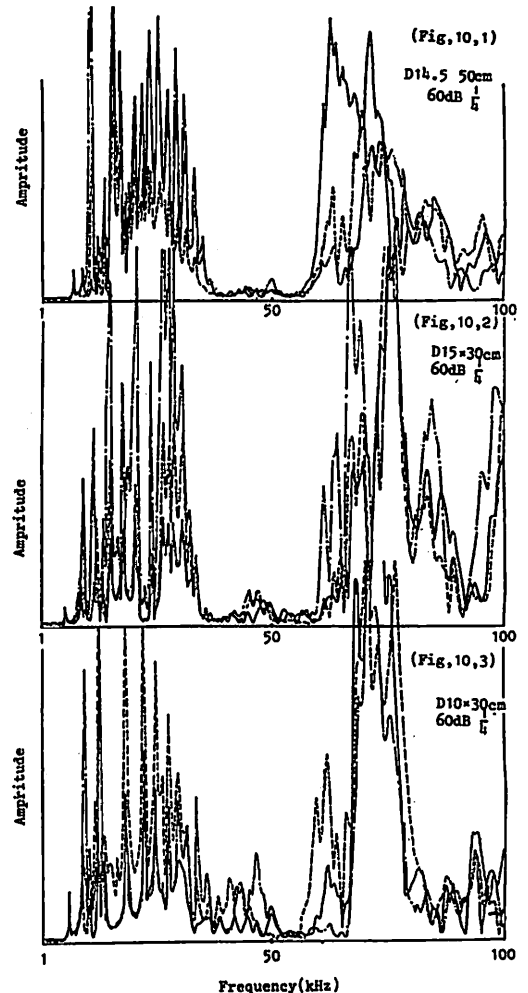


Fig. 10. Variation of filter properties for the specimen size in the frequency range 1~100kHz.



あるのに比べて、約65 kHz以上の領域でのピーク群は柔和なものが多い。この低周波数領域における著しく尖ったピークは供試体の相対する壁面間距離のような、明確な供試体因子に基づく共振現象に基づくものと推察される。

4-4 骨材寸法がフィルター特性に及ぼす影響

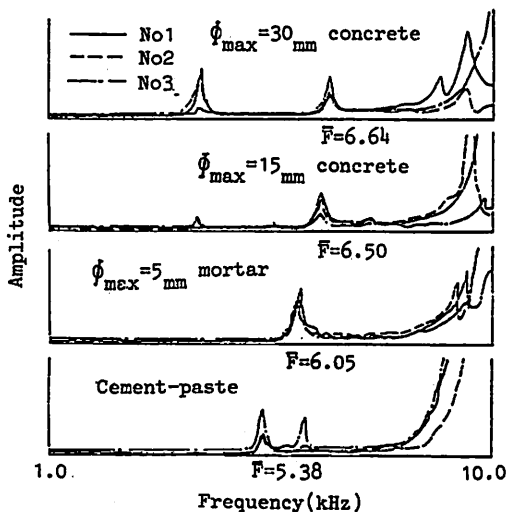


Fig. 11. Variation of filter properties for the maximum size of aggregate in the frequency range of 1~10kHz.

Fig. 11はW/C一定(55%,ただし、セメントペーストは38%)のプレーンコンクリート(骨材寸法30~5 mmおよび15~5 mm),プレーンモルタル(骨材寸法5~0 mm)およびセメントペーストの標準養生,材令28日におけるフィルター特性を周波数領域1~10kHz間で示したものである。これより;セメントペースト,モルタル,粗骨材最大寸法15mmのコンクリート,同じく30mmのコンクリートの順に初期ピーク周波数が大きくなっている事が判る。これはセメントペーストと骨材の各々が持つ超音波伝播速度(または弾性係数)の相違に基づくものと考えられる。すなわち,セメントペーストよりも弾性波速度の大きい骨材がコンクリートまたはモルタル中で占める割合 $p_a$ (容積百分率)が大きくなるほど系としての伝播速度は大きくなる。本実験における粗骨材最大寸法30mmのコンクリートでは $p_a=72%$ ,同じく15mmのコンクリートでは $p_a=70%$ ,モルタルでは $p_a=51%$ となっている。試算的に式(8)を用いて $\bar{F}_1$ の値よりこのセメントペーストの縦波速度の概略値を求めてみると $C_p=3230\text{m/sec}$ とな

る。一方、骨材の縦波速度は岩質によって多小異なるが、一般的には5.0~6.5 km/sec程度のものである<sup>10)</sup>。また、これらのコンクリート,モルタル,セメントペーストについて周波数領域50~500 kHz間のフィルター特性も検討した。その結果,セメントペーストおよびモルタルが高周波数領域,特に,約200 kHzより高い部分でピーク振幅が大きくなっているのに比べて,粗骨材最大寸法の大きいコンクリートほどピーク振幅が小さくなっていることが判った。したがって,骨材寸法の大きいコンクリートほど,特に高周波数領域の超音波の減衰が激しくなるものと考えられる。

4-5 空気量がフィルター特性に及ぼす影響

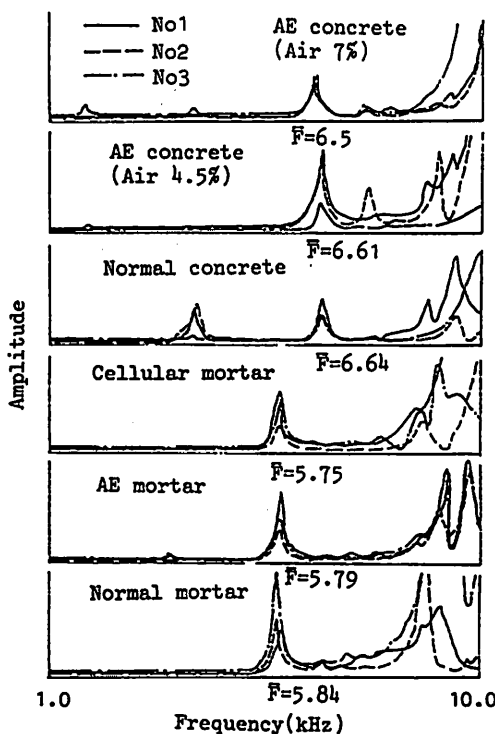


Fig. 12. Variation of filter properties for air content in the frequency range of 1~10kHz.

Fig. 12はW/C=55%,スランプ12cmまたはフロー値135~150mmのコンクリートおよびモルタルの空気量変化に伴う周波数領域1~10 kHz間の材令28日におけるフィルター特性である。コンクリート,モルタル共に空気量の増加に伴って $\bar{F}_1$ が若干ずつ小さくなっていることが判る。これは空気量増加に伴って,

コンクリートまたはモルタル中に微細な空気の泡が沢山増加するため、超音波の伝達速度を阻害するものと考えられるが、この空気量増加は強度低下に反映されるので、結果的には  $F_1$  の変化と強度変化が結びつくことになる。ただし、この場合、気泡モルタルを除いて、空気量の絶対量的変化はコンクリート全体から見ると微小であるので、 $F_1$  の変化も小さいものと考えられる。尚、この場合の気泡モルタルについては、気泡の浮き上りによる材料分離の現象が激しかったため、同等の比較議論はできないものとする。また、これらのコンクリートおよびモルタルの周波数領域50~500 kHz 間のフィルター特性についても検討した。その結果、前節に見たように、モルタルのフィルター特性がコンクリートのそれに比べて特に高周波数領域においてピーク振幅が大きい事が判った。コンクリートまたはモルタル別に見た場合、空気量の増加に伴って全周波数領域での若干ずつの振幅の低下が見られた。これは先に述べたように、空気量増加に伴う微細空気泡の増加が超音波の伝播を阻害しているものと考えられる。

4-6 水セメント比がフィルター特性に及ぼす影響

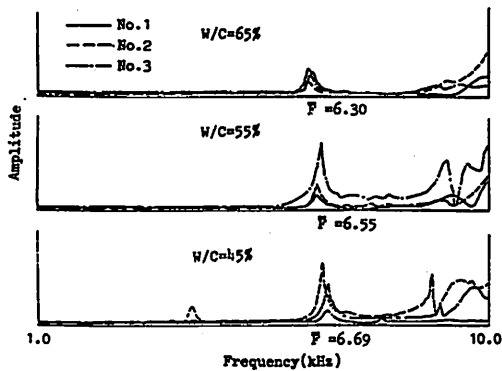


Fig. 13. Variation of filter properties for water-cement ratio in the frequency range of 1~10kHz.

Fig. 13は粗骨材最大寸法30mm, スランブ12cmのプレーンコンクリートの材令28日における W/C変化に伴うフィルター特性を周波数領域1~10kHz 間で示したものである。これより、W/Cが小さくなるに従って  $F_1$  が大きくなっている事が判る。これは W/Cが小さくなるに従ってセメントペースト中のセメント濃度が大きくなり、硬化ペースト中の弾性波伝播速度が大きくなるためと考えられる。また、これらのコン

クリートの周波数領域50~500kHz 間の材令14日目におけるフィルター特性も調べた。若材令でピーク振幅が不十分なため、一概に言えないが、W/Cが大きくなるに従ってピーク振幅が全体的に小さくなる傾向がみられた。これは W/Cの増加と共にセメントペースト濃度が薄くなること、および、配合変化に伴う  $p_a$  の増加等が考えられる。配合より  $p_a$  を求めてみると W/C=65%で  $p_a \approx 74\%$ , W/C=55%で  $p_a \approx 72\%$ , W/C=45%で  $p_a \approx 70\%$  となっている。

4-7 弾性係数と強度との関係

本実験で使用したシリーズ D, E, F, G の全てのコンクリート、モルタル、セメントペーストについて式(8)によって求めた動弾性係数と圧縮強度との関係を探ると Fig. 14 のようになる。従来より動弾性係数と強度との関係については多くの実験がなされており、

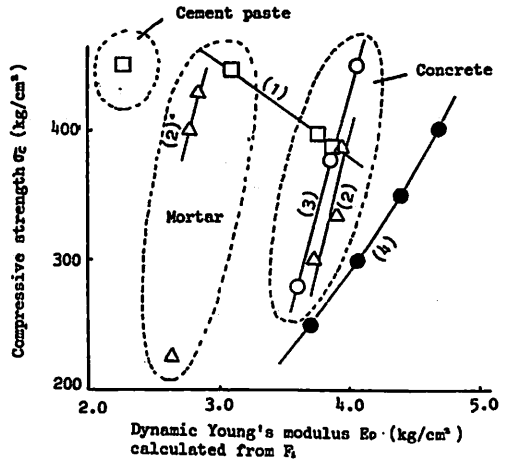


Fig. 14. Relations between  $E_D$  and  $\sigma_c$  for several conditions, (1)variation of aggregate size, (2)variation of air content, (3)variation of water-cement ratio, and (4)experimental expression by Takabayashi are shown.

さまざまな経験式が提案されている。その中の一つ、高林の式<sup>15)</sup>(13)

$$E_d = 2.65 \sqrt{\sigma_c} \times 10^4 \quad (13)$$

を参考までに取り上げて図中に示している。この図より、W/C変化、空気量変化に対する曲線勾配は正の傾きで変化しているのに比べて、骨材寸法に対しては

緩やかな負勾配であり、特に、コンクリート、モルタル、セメントペーストの各グループが明瞭に区分された状態で存在する事が判る。また、 $W/C$ と空気量変化に伴う曲線勾配は(気泡モルタルを除いて)ほぼ同じであり、同じような関係になり立っているものと考えられる。なお、気泡モルタルについては、打設時の気泡の浮き上りによる材料分離が著しかったので、極端な強度低下となったものと考えられる。故に、これを議論から除外した。また、高林の式に基づく結果はここでの結果に比べて  $E_d$  が若干大きな値となっている。これは先に示したように、超音波法による共振点の測定結果が共振法のそれに比べて若干差がある事、骨材の質やサイズおよび配合等、実験条件が異なる事等を考えるとき、同等の比較はもちろんできない。しかし、本実験で得られた結果より、コンクリートの圧縮強度と動弾性係数との関係には多くの影響要因が絡んでおり、決して、単純に結び付くものではないと思われる。圧縮強度と動弾性係数を精度良く結びつけるためには、これらの多くの影響要因を取り込んだ関係式を導き出す事が必要であると考えられる。

4-8 凍結融解試験への適用

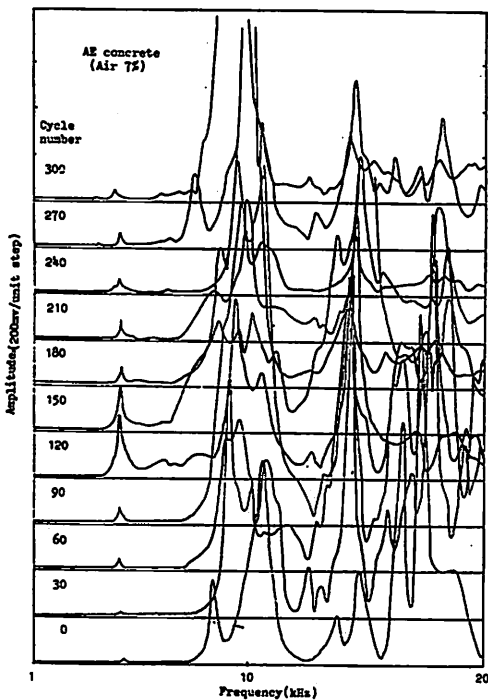


Fig. 15. Variation of filter properties in the freezing and thawing testing.

Fig. 15はAEコンクリート(空気量)7%の凍結融解試験過程におけるフィルター特性の変化の一例を周波数領域1~20kHzで示したものである。5kHz周辺の初期ピークの位置やその振幅のサイクル数に対する変化の様子が判る。また、後続の第2ピーク、第3ピーク等、高周波数領域におけるいくつかの集積するピーク群が観察されるが、第2ピーク以後のものについては、今一つ明瞭さに欠けるため、取り扱いが困難となっている。すなわち、凍結融解サイクル数の変化に対するピークの位置や振幅の変化に一貫性が欠けている事である。これは測定時におけるアダプター脱着のくり返しの結果、センサー取り付け位置におけるコンクリート表面が相当損傷し、センサーの供試体表面への接触状況が変化する事やセンサー取り付け位置の微小な変化等に起因するものと考えられる。試験中を通して終始安定した状態でセンサーを取り付けられるような工夫が必要である。また、Fig. 16は  $W/C=55\%$ 、スランプ8cmのプレーンコンクリートおよびAEコンクリート(空気量7%)についての凍結融解過程における  $F_1$ と  $f_1$ に基づく相対動弾性係数  $(F_{1n}/F_{10})^2$ 、 $(f_{1n}/f_{10})^2$ の変化を求め、重量減少率の変化との関係を示したものである。これより、超音波法、共振法共

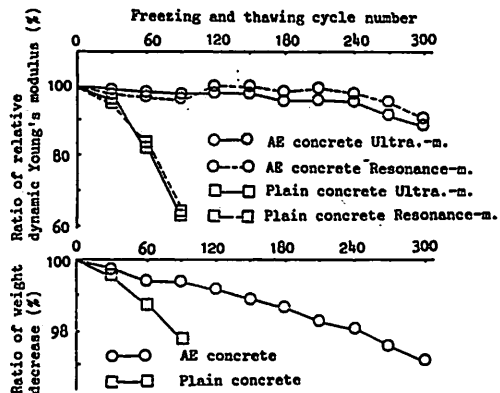


Fig. 16. Variation in the freezing and thawing of ratio of relative dynamic Young's modulus by ultrasonic method and resonance method, and ratio of weight decrease.

に相対動弾性係数の変化はほぼ一致する事が判る。また、重量減少率も相対動弾性係数変化にほぼ沿っている事が判る。さらに、Fig. 17は  $W/C=55\%$ のAEコンクリートの凍結融解過程におけるフィルター特性を周波数領域1~100kHz間で示したものである。これ

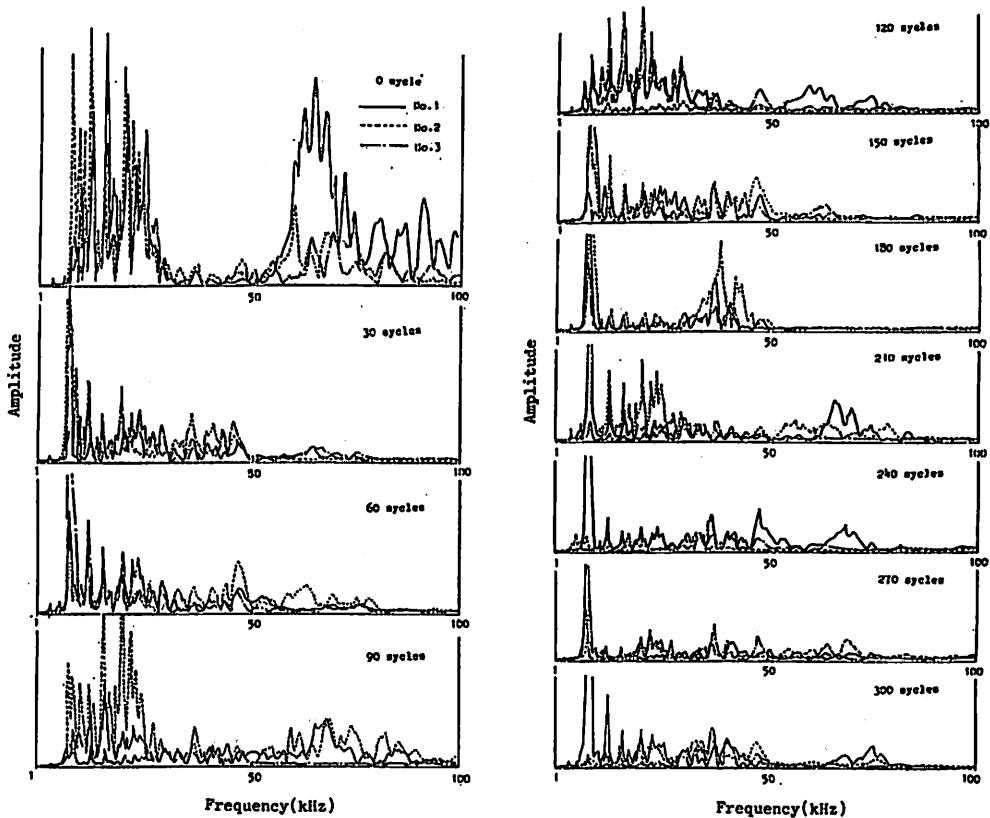


Fig. 17 Variation of filter properties in the freezing and thawing testing in the frequency range of 1~100 kHz.

より、凍結融解のくり返し回数が多くなるにつれて周波数応答曲線の振幅が低下して行く事、特に、高周波数領域での応答曲線の振幅が急激に低下していることが判る。また、同時に行った  $W/C=55\%$  の普通モルタルとの比較の結果、AEコンクリートは普通モルタルに比べてピーク振幅の低下速度が遅い事が判った。これは、凍結融解くり返しにより、コンクリート中の骨材とセメントペーストの接触面の剥離現象を含む微小ヒビ割れが多数発生する結果、特に波長の短い、すなわち、周波数の大きい超音波ほど通過困難となってくるものと考えられる。また、AEコンクリートはモルタルに比べて振幅の低下速度が相当遅くなった。これはAEコンクリートがモルタルに比べて劣化しにくい事を示しているものと考えられる。すなわち、この周波数応答全体を定量的に把握できるならば、凍結融解の度合を示す指標となり得るものと考えられる。

## あとがき

コンクリート部材における超音波フィルター特性の基本的特性を理解するために、フィルター特性に影響を及ぼす要因を種々検討し、材令と凍結融解過程における関係を明らかにした。

本研究においては基本的に問題として未解決な部分が多々ある。例えば、センサーのアタッチメントの問題、岩質の異なる骨材を用いたコンクリート、内部欠陥(例えばヒビ割れやポーラ、蜂の巣等)や外部欠陥(豆板)のフィルター特性への影響等である。また、超音波の取り扱いにおいては、相対的比較による判断が多く、絶対量の把握が困難とされている。故に、その評価は定性的とならざるを得ないと思うが、今後は各種の実験と同時に解析に取り組み、その定量的把握に努めたい。

## 参 考 文 献

- 1) Y.H. Pao "Elastic Waves and Non-Destructive Testing of Materials" AMD-Vol. 29, 1978, Dec.
- 2) 石井勇五郎: "非破壊検査工学" 産報出版, 1982, 6.
- 3) H.W. Chung, K.S. Law "Diagnosing in Situ Concrete by Ultrasonic Pulse Concrete Technique" international Oct. 1983.
- 4) L.I. Knab, G.V. Blessing, J.R. Clifton, "Laboratory Evaluation of Ultrasonic of Crack Detection in Concrete." ACI Journal, No. 80-3, 1983, Jan.-Feb.
- 5) 岡田清, 小柳治, 六郷恵哲: "コンクリートの曲げ引張り破壊過程に関するエネルギー的考察" 土木学会論文報告集, 第285号, 1979, p109.
- 6) 小林昭一, 大津政康: "アコースティック・エミッションのコンクリート工学への応用" コンクリート工学 Vol. 16, No. 7, July, 1978, p9.
- 7) 丹羽義次, 小林昭一, 大津政康, 奥田和男: "アコースティック・エミッションの周波数特性に関する考察" 土木学会論文報告集, 第314号, 1981, 10, p. 132.
- 8) 丹羽義次, 小林昭一, 大津政康: "アコースティック・エミッションの発生機構に関する考察" 土木学会論文報告集, 第314号, 1981, 10, p. 125.
- 9) J.L. Rose "Elements of a Feature-based Ultrasonic Inspection System" Materials Evaluation 42, Feb. 1984, p. 210.
- 10) R.N. Thurston, "Physical Acoustics-Principles and Methods" Vol. XV Academic Press, 1981.
- 11) R.S. Sharpe, "Industrial Development of Nondestructive Testing of Materials by Ultrasound." Elastic Waves and Nondestructive Testing of Materials. AMD-Vol. 29, p. 1.
- 12) L.S. Fu, "Mechanical Aspects of NDE by Sound and Ultrasound" AMR-Vol. 35, No. 8, Aug. 1982.
- 13) 柏忠二: "コンクリートの非破壊試験法" 技報堂, 昭和56年3月
- 14) 坂田, 大津: "超音波によるコンクリート構造物の劣化度急速判定に関する基礎研究(第1報)" 九州東海大学工学部紀要, 第11号.
- 15) 坂田, 大津: "同上(第2報)" 同上.
- 16) 佐藤泰夫: "弾性波動論" 岩波
- 17) 高林利秋: "コンクリート無破壊試験法" 日刊工業新聞社, 昭和28年.
- 18) 土質工学会: "岩の工学的性質と設計・施工への応用" 昭和57年12月, p. 184.