

超音波スペクトロスコピーに基づくコンクリートの ひびわれ評価に関する基礎研究

CRACK EVALUATION IN CONCRETE BY ULTRASONIC SPECTROSCOPY

坂田康徳*・大津政康**

By Yasunori SAKATA and Masayasu OHTSU

A non-destructive method based on the ultrasonic spectroscopy is studied for the evaluation of the crack depth in concrete members. A surface method, where both a transmitter and a receiver are attached on the same surface of a specimen, is investigated. Spectral responses are measured by driving sinusoidal waves of sweep mode from a function generator. It is shown that the spectral response due to the sweep mode input is equivalent to Fourier spectrum obtained from a direct signal due to impulsive input. The sweep time is tested to examine the relationship between the spectral response and the Fourier spectrum. To improve the reproducibility of the spectral responses, several coupling materials, which are inserted between the transducer (both a transmitter and a receiver) and the concrete surface, are investigated. Specimens with artificial cracks are tested to study the effect on the evaluation of crack depths in concrete members. Experimental results are analytically examined by the resonance analysis of the finite element method. These experimental and analytical results show that the present method is promising for the evaluation of the crack depth in concrete members.

Keywords : ultrasonic, spectroscopy, non-destructive method, sweep mode

1. ま え が き

昭和30年代半ばより急速に発展した建設投資の増加は、多くのコンクリート構造物を生みだしてきたが、約30年経過した今日、それの中にはアルカリ骨材反応や塩害その他によると考えられる耐久性の欠如が問題となるような構造物も存在していることが明らかになっている¹⁾。そこで、構造物の安全性確保と有効利用の見地から、これらの構造物に存在する各種欠陥を早期に発見し、適当な処置を施して構造物の安全性を確保するとともに、構造物の残存寿命をできるだけ延命して有効利用を計らねばならない。これらを実現するためには、実在コンクリート構造物に生じている各種欠陥を、効果的に評価し得る方法の開発が急務である。

コンクリート構造物に生じる欠陥はさまざまであるが、特にひびわれや空隙などの存在とその規模は構造物の耐久性に大きな影響を及ぼすことが知られている。これらの欠陥を評価するための方法²⁾として超音波法(音速法)、AE法、赤外線法、X線法、放射線法その他が

実施・検討されているが、大部分ははまだ開発途上であり、汎用性の点から多くの問題点が残されている。

このうち超音波を利用したコンクリート中の欠陥評価に関する研究は、すでにかなり紹介されている。諸外国での近年の例としては、従来の音速法を利用したものとして G. Bradfield ら³⁾の舗装板厚さの評価、H. W. Chung ら⁴⁾の内部空隙評価、L. I. Knab ら⁵⁾の部材中の疑似内部欠陥評価、P. D. Cady ら⁶⁾の橋梁床板の劣化度評価等の研究などがみられる。一方国内では、秋鹿⁷⁾の打撃法による構造物内部のひびわれや空隙あるいは部材寸法の評価、尼崎⁸⁾の部材のひびわれ深さの評価に関する研究などがみられる。これに続いて、近年では、コンクリート中を伝播する弾性波の周波数分析により、コンクリート内部の諸状況を評価しようとする研究も試みられている。この方法は、O. R. Gericke が金属内部における欠陥評価において、材料中を通過したパルスの周波数解析を行ったことに始まるとされており、これは超音波スペクトロスコピーと名付けられている⁹⁾。このコンクリート工学の分野への適用としては、尼崎・明石¹⁰⁾が入力パルスに対する受信波のスペクトル解析によってアルカリ骨材反応を起こしたコンクリート部材の劣化度評価ならびにコンクリートの凝結硬化度の評価に関する研究を行っている。N. J. Carino, M. Sansalone^{11), 12)}は、

* 正会員 九州東海大学助教授 工学部土木工学科
(〒862 熊本市大江町鹿渡223)

** 正会員 工博 熊本大学助教授 工学部土木工学科
(〒860 熊本市黒髪2-39-1)

時間領域における受信波形の観測で、重複波により判別しにくい欠陥の影響をスペクトル解析によって解決しようとしている。また、山田・小阪¹³⁾は入力パルスに対する受信波のフーリエスペクトルの高周波数成分(200 kHz付近)の減衰特性を利用して、火災を受けたコンクリートの劣化度評価を研究している。

著者らもコンクリート中を伝播する超音波の周波数特性(以前はフィルター特性とよんでいた)を用いて、材料内部の諸状況(ひびわれ、空隙、劣化度等)を評価する方法を研究している¹⁴⁾。この手法は、発信器のスイープモード入力を利用して得られる応答スペクトルを用いたスペクトロスコピーであり、手軽な装置で構成できるうえに、任意の周波数領域を簡単な操作で計測できるので、経済性および操作性の点で、フーリエ解析による方法より有利という点に特徴がある。

以下では、本方法の理論的背景および計測方法について述べ、配合や形状の異なる角柱供試体に設けた人工ひびわれにおけるひびわれ深さの評価に関する実験およびその有限要素解析によるスペクトル成分の解明を行って、スペクトロスコピーの適用性を検討する。

2. 原理および計測法

(1) 原理

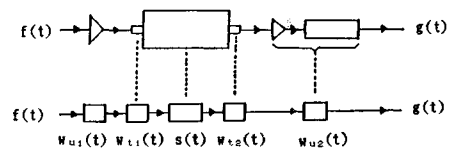
応答スペクトルの計測システムの理論的背景を概記すれば次のようになる。すなわち、図-1に示すように、波動の伝播する系(これをシステムという)における入力波 $f(t)$ に対するシステム通過後の出力波を $g(t)$ とすれば、 $f(t)$ はシステムの変換機能によって $g(t)$ に変えられて取り出される。このシステムを線形システム論に従って時間領域で表わせば次のようになる¹⁵⁾。

$$g(t) = f(t) * w_{u1}(t) * w_n(t) * s(t) * w_{t2}(t) * w_{u2}(t) \quad (1)$$

ただし * 印は合成積を表わし、また $w_{u1}(t)$, $w_n(t)$, $s(t)$, $w_{t2}(t)$, $w_{u2}(t)$ はそれぞれ増幅器、発信トランスデューサ、供試体、受信トランスデューサおよび前置増幅器や検波器等の衝撃応答関数を表わす。なお、2.(4)に示す応答スペクトルの再現性に関するトランスデューサとコンクリート表面間の結合状態の影響は、結合材の応答特性も含めて $w_n(t)$, $w_{t2}(t)$ の中に含まれるものとする。そこで、 $g(t)$, $f(t)$, $w_{u1}(t)$, $w_n(t)$, $s(t)$, $w_{t2}(t)$, $w_{u2}(t)$ をフーリエ変換して得られる伝達関数を $G(f)$, $F(f)$, $W_{u1}(f)$, $W_n(f)$, $S(f)$, $W_{t2}(f)$, $W_{u2}(f)$ とすれば、上式の周波数領域での式は次のようになる。

$$G(f) = F(f) \cdot W_{u1}(f) \cdot W_n(f) \cdot S(f) \cdot W_{t2}(f) \cdot W_{u2}(f) \quad (2)$$

本研究の目的は、材料中への弾性波の入出力という非破壊的な観測により、材料内部の諸状況を $S(f)$ を通し



$f(t)$:入力波, $g(t)$:受信波, $w_{u1}(t)$:増幅器の衝撃応答関数
 $s(t)$:供試体の衝撃応答関数, $w_{n1}(t), w_{t2}(t)$:発信および受信トランスデューサの衝撃応答関数, $w_{u2}(t)$:プリアンプおよびディスクリミネータ等の衝撃応答関数

図-1 波の伝播経路

て把握することを目的とするものである。供試体の $S(f)$ を求めるには、時間領域で得られる信号 $s(t)$ のフーリエ変換を行う必要がある。時間領域における信号 $s(t)$ のフーリエ変換 $S(f)$ (これを特にフーリエスペクトルとよんで、スイープモードによる応答スペクトルと区別する) は、数学的には $s(t)$ を個々の周波数成分に分解した場合の対応する周波数成分の振幅値を、周波数軸上で整理し直したものである。したがって、システム全体が線形であるならば、 $S(f)$ は個々の周波数成分に対応する応答として得ることもできるはずである。この応答スペクトルとフーリエスペクトルとの等価性については2.(3)で検討する。

以下の各実験で示される応答スペクトルは、実際にはすべての計測器の特性をも含んだ $G(f)$ となっている。 $G(f)$ から $S(f)$ を得るためには、計測器のみからなるシステムの応答スペクトル $G_0(f)$ より、以下の補正で求められる。

$$S(f) = G(f) / G_0(f) \quad (3)$$

ただし、 $G_0(f) = F(f) \cdot W_{u1}(f) \cdot W_n(f) \cdot W_{t2}(f) \cdot W_{u2}(f)$ この $G_0(f)$ は発信および受信トランスデューサを直接接触した場合に得られる応答スペクトルである。図-2は、 $W/C=55\%$ の普通コンクリートの角柱供試体(10×7.5×40 cm)における周波数領域0~51.1 kHz間の応答スペクトルに関する $G_0(f)$, $G(f)$, $S(f)$ を示している。計測器のみからなるシステムの応答スペクトル $G_0(f)$ は全体的に滑らかな曲線であるのに比べて、供試体を含むシステムの応答スペクトル $G(f)$ は非常に凹凸

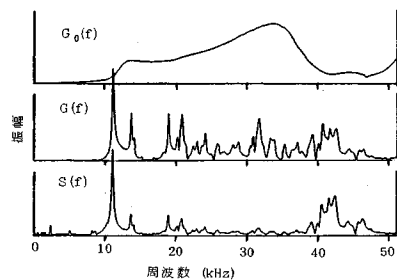


図-2 計測器の応答スペクトル $G_0(f)$, システム全体の応答スペクトル $G(f)$, 供試体だけの応答スペクトル $S(f)$

が激しくなり、補正後の供試体みの応答スペクトル $S(f)$ は、結果的に $G(f)$ と大差ないものとなっている。したがって、ここで使用した計測器を用いる限りにおいて、 $G(f)$ をもって材料の応答スペクトル $S(f)$ を議論しても支障ないものと考えた。

(2) 計測法

図-3は超音波応答スペクトルの計測システムを示す。ここで使用しているトランスデューサは発信と受信の両方に使用できる広帯域トランスデューサ (AE 905 s 型, NF 社製) であり、また、プリアンプ (AE 911, NF 社製) とディスクリミネータ (AE 921, NF 社製) は周波数帯域 10 k~2 MHz のものを使用している。それゆえ、約 10 kHz 以下の低周波数領域では感度が悪くなっている (図-2 参照)。

本方法では、測定する供試体の全体を通じて、測定周波数領域内のピーク尖端が、すべて飽和することなく確実に記録できるように、あらかじめ入力信号の電圧と受信波の増幅率を適当な大きさに調整して測定した。ゆえに、以下に示される図中の応答スペクトル振幅はすべて相対的なものである。

(3) 応答スペクトルとフーリエスペクトルの等価性

スイープモードで発生した一定振幅で、連続的に周波数の変化する入射波による応答は、衝撃波が材料内部を通過した後の受信波をフーリエ変換して得られる周波数特性に原理的には等価である。理論的には式 (1) で衝撃波は $f(t) = \delta(t)$ に相当する。そして、その場合のフーリエ変換は $F(f) = 1$ となる¹⁵⁾。一方、スイープモード入力では $F(f) = \text{const.}$ に相当する。両者の違いは、全領域にわたって一定の周波数成分を含む弾性波の周波数成分を一時に送信するか、個々に連続的に送信するかの違いである。ただし実際の実験では、理想的な衝撃波の発生が難しく、また非常に短い時間の信号をデジタルメモリや波形解析器でデジタル的に記録し、記録された有限個のデータで解析するため、ウィンドウ操作をしなければ、フーリエ変換による結果は、アナログ的に平均化された応答として得られる応答スペクトルに比べてかな

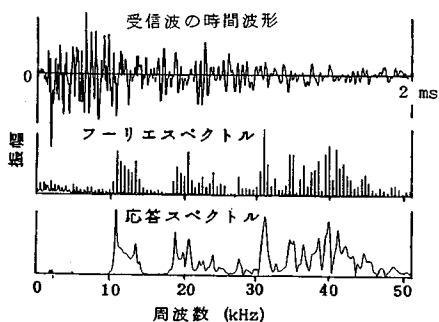


図-4 応答スペクトルとフーリエスペクトルの比較

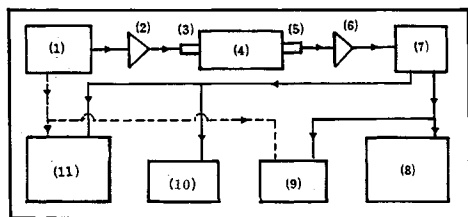
り尖鋭なものとなる。図-4は、10×7.5×40 cm 角柱供試体に発信および受信トランスデューサを固定したままで得られた、パルス幅 20 μs のパルス受信波のデジタル時間波形とそのフーリエスペクトル、およびスイープモードによる応答スペクトルの一例を示している。エンベロープを考慮したフーリエスペクトルの概形は応答スペクトルとほとんど一致しており、応答スペクトルとフーリエスペクトルの等価性が認められる。

この等価性については ASTM が AE トランスデューサの周波数応答に関する性能検査で認定している検定方法にも示されている¹⁶⁾。そこでは、ホワイトノイズ、衝撃波、スイープモード入力のいずれでもトランスデューサの応答を検定してよいとされている。

(4) トランスデューサの取付けと応答スペクトルの再現性

一般に、音速法等における被検体へのトランスデューサの取付けには、被検体表面とトランスデューサ先端面間の波動エネルギーの伝達性能を良くするために、結合材として水性ゼリーやグリースが使用されている。本方法でも、以前にはコンクリート表面をサンドペーパーや硬質石膏で表面処理をするとともに、結合材としてグリースを使用してきた¹⁴⁾。ここで使用しているトランスデューサは図-5に示すように、直径が約 12 mm で、高さが約 40 mm の縦長の円筒形をしているため、トランスデューサ取付け時の微妙な差異に基づくと考えられる応答スペクトルのばらつきが大きいことがこれまでの研究でわかっている。ばらつきの主な原因は、トランスデューサ取付け時におけるトランスデューサとコンクリート表面間の結合状態の相違に基づいているものと考えられ、以下のことが考えられる。

- ① コンクリート表面の微小な凹凸
- ② グリースへの砂粒やゴミの混入
- ③ トランスデューサの微小な傾き
- ④ トランスデューサ取付け位置におけるコンクリート表面付近の空隙や骨材の存在



(1) 信号発生器, (2) 増幅器, (3) 発信トランスデューサ
(4) 供試体, (5) 受信トランスデューサ, (6) プリアンプ
(7) ディスクリミネータ, (8) オシロスコープ, (9) カウンター
(10) デジタルマルチメータ, (11) 出力計

図-3 計測システムのブロックダイアグラム

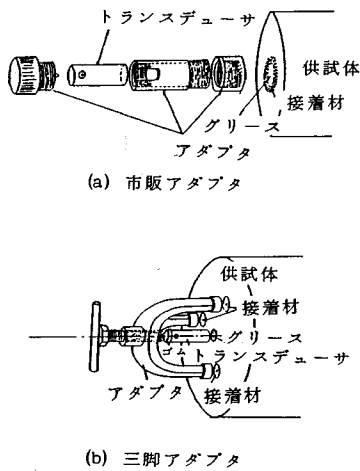


図-5 市販アダプタと三脚アダプタ

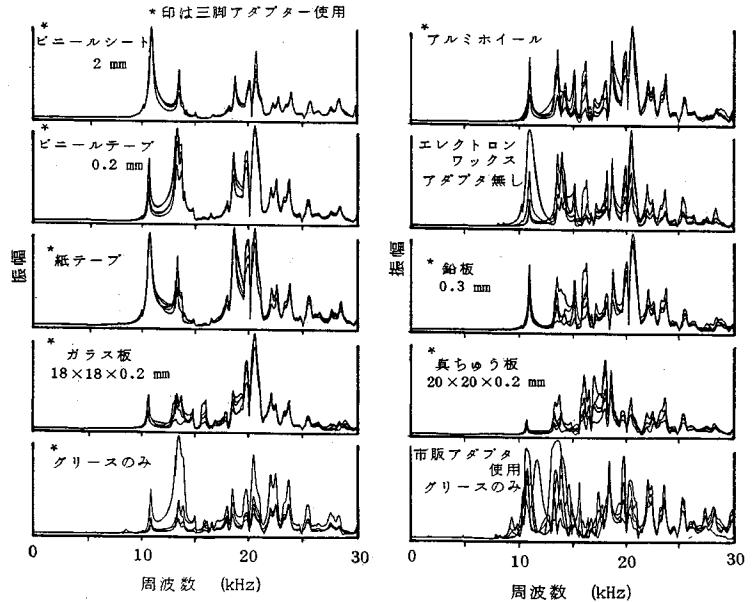


図-6 各種結合材使用における応答スペクトルの再現性比較

⑤ トランスデューサ押し付け圧力

これらのばらつきの原因のうちで、人為的に避けられるものを極力避け、応答スペクトルの振幅のばらつきを少なくするために、次の2点について改善を試みた。

第1には図-5 (a) に示されるようなトランスデューサ取付けのための市販の専用アダプタを使用せず、図-5 (b) に示すような塩化ビニール製三脚アダプタを試作したこと、第2にはトランスデューサとコンクリート表面間に適当な軟らかさの結合材を挿入し、グリースを介してトランスデューサを取り付けたことである。結合材の選択では軟らかいものとしてビニールシートや紙などを、また硬いものとしてガラス板や金属板などを選び、グリースのみの場合やワックス使用の場合も含めて合計10種類の取付け方法を検討した。図-6は角柱供試体(10×7.5×40 cm)について、上記の各トランスデューサ取付け方法で測定した周波数領域0~30 kHz間の応答スペクトルを示している。実験はコンクリート表面をサンドペーパーで平滑にした後、トランスデューサをおのおの5回ずつ付け直して測定した。これらのうちで、厚さ約2 mmのビニールシートをトランスデューサ先端に張り付けた後、グリースを介してコンクリート表面に取り付けた場合、厚さ約0.2 mmのビニールテープを同様にして使用した場合、厚さ約0.05 mmの紙テープを同様にして使用した場合の3ケースが比較的応答スペクトルの再現性が良く、その中でも厚さ約2 mmのビニールシート使用の場合が最も再現性が優れていることがわかる。これはビニールシートの適当な弾力性がコンクリー

ト表面の微小な凹凸やトランスデューサの若干の傾きによるトランスデューサとコンクリート表面間の間隙を極力少なくし、その接合状態を良好に保つためと考えられる。また、ガラス板や鉛板あるいは真ちゅう板などのように、表面が平滑であっても硬い材料をコンクリート表面に張り付けた場合には相当ばらつきが生じており、単に表面平滑なだけでは不十分であることがわかる。

以上の結果より、本実験のように0~30 kHz間の低周波数領域では厚さ約2 mmのビニールシートが効果的であることがわかった。それゆえ次節の実験では、供試体表面をサンドペーパーで処理した後、グリースとともに厚さ約2 mmのビニールシートを結合材に使用方法を採用した。

(5) スイープ時間が応答スペクトルに及ぼす影響

本方法で応答スペクトルを得る場合、スイープ時間が応答スペクトルに及ぼす影響が問題となる。図-7は10×7.5×40 cm角柱供試体において、周波数領域0~51.1 kHz間とし、スイープ時間を5 ms~100 msまで段階的に変化させて得られた応答スペクトルと、パルス幅20 μsの矩形波パルスを送信した場合におけるフーリエスペクトルを示している。スイープ時間が100 ms以下では応答スペクトルの形状が鈍ってしまい、ピーク位置が高周波数側へ大きく移動していることがわかる。スイープ時間が250 msでは応答スペクトル形状がほぼ整うが、250 ms~1 sまでの間ではいまだピーク周波数が安定しておらず、若干高周波数側へ偏ったものとなっており、スイープ時間が長くなるに従って、ピーク位置も

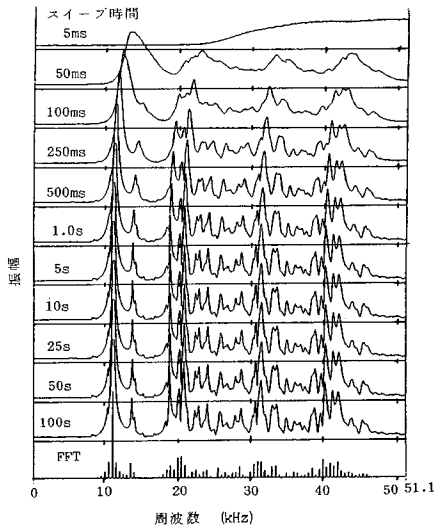


図-7 スイープ時間の相違に基づく応答スペクトルの変化とフーリエスペクトルとの関係

安定化に向かっている。そして、スイープ時間が1sより長くなるとピーク位置はほぼ定位置に現われるようになり、またフーリエスペクトルと比較するとほとんど等価なものとなっている。これより、スイープ時間をあまり短く（たとえば1秒以下）するとピーク周波数が高くなり、フーリエスペクトルとの等価性に問題が生じることがわかる。ゆえに本方法を用いる場合には、安全性を見込んでスイープ時間を約5秒以上とるのが望ましく、3.の実験ではすべてスイープ時間を10秒間とした。

3. 角柱供試体におけるひびわれ評価

応答スペクトルを用いての角柱供試体におけるひびわれ評価に関する研究の一部はすでに報告済みである¹⁴⁾。ここでは初期ピークとよんだ応答スペクトルの特定ピーク周波数に着目し、ひびわれ評価を試みた。ここでは、ひびわれ深さの変化に対して明瞭な動きをする他のピークに着目し、ひびわれ導入前後における部材の形状共振に基づくピーク周波数比より、ひびわれ情報を取り出す方法を検討する。まず、ひびわれ評価に対する材料的要因としてコンクリートの水セメント比、骨材寸法や空気量、鉄筋の存在等による影響を検討する。次いで幾何形状的要因として部材の形状寸法やひびわれ位置の影響を検討する。さらに有限要素法 (FEM) によるひびわれを有する部材の二次元共振解析を行って、応答スペクトルとの対応を検討する。

(1) 実験

表-1 は今回使用したコンクリートの配合条件および特性値を、また表-2 は各実験内容と供試体形状寸法を示している。応答スペクトルは、各供試体ともひびわれ

表-1 使用コンクリートの配合条件と特性値

配合	φ	SL(FL)	AIR	W/C	W	f _c	E	ν
A	20	4	1.3	45	187	48.6	0.324	0.21
B	20	4	1.3	55	187	40.2	0.317	0.21
C	20	4	1.4	65	187	34.4	0.301	0.21
D	5 (186)		3.2	55	293	33.7	0.437	0.22
E	15	5	2.5	55	193	39.8	0.312	0.21
F	30	5	1.2	55	189	38.3	0.312	0.20
G	20	5	3.5	55	175	32.7	0.296	0.21
H	20	5	6.7	55	166	34.3	0.293	0.22

φ:粗骨材最大寸法(mm), SL:スラブ°(cm), FL:70°値(mm)
 AIR:空気量(%), W/C:水セメント比(%), ν:ポア率比
 W:単位水量(kg/m³), f_c:圧縮強度(MPa)
 E:弾性係数(×10⁵MPa)

表-2 実験シリーズの内訳

実験シリーズ	実験内容	供試体寸法 (cm)	配合
(1)	w/cが変化するケース	10×7.5×40	A, B, C
(2)	骨材寸法や空気量が異なるケース	10×7.5×40	B, D, E
(3)	鉄筋コンクリートのケース	10×7.5×40	B
(4)	部材長さが変化するケース	10×7.5×(40, 38, 36, 34)	B
(5)	部材断面寸法が異なるケース	15×15×53	B
(6)	ひびわれ位置が異なるケース	10×7.5×40	B

導入前後で測定した。ひびわれの種類は、無筋コンクリートの場合は幅約1.2mmのカッターにて所定の深さに切り欠いた人工ひびわれであり、また、鉄筋コンクリートの場合は厚さ約5mmのストレッチ樹脂板を埋め込んで作った人工ひびわれである。

応答スペクトルの測定は図-8に示すように、ひびわれ面の中心線に沿って、ひびわれの両側5cmの位置に発信および受信トランスデューサを取り付けて行う表面法で実施した。測定は発信および受信トランスデューサをそれぞれ3回ずつ付け直して測定した。このときのスイープ時間は10秒間とし、発信器の電圧を5V、入力側波形増幅率を10倍、受信側増幅利得を40dBと一定にして測定した。

図-9は配合AすなわちW/C=45%のコンクリートで、部材寸法が10×7.5×40cmの供試体における、人工ひびわれ深さhの増加に伴う応答スペクトルの変化状況を示している。図中に矢印で示す3個のピークA, B, Cは応答スペクトル上の主なピークを示している。ピークAは初めは約12kHz付近にあり、hが部材高さ

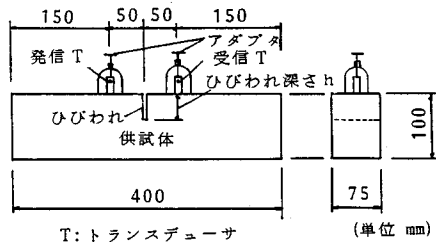


図-8 トランスデューサ配置図

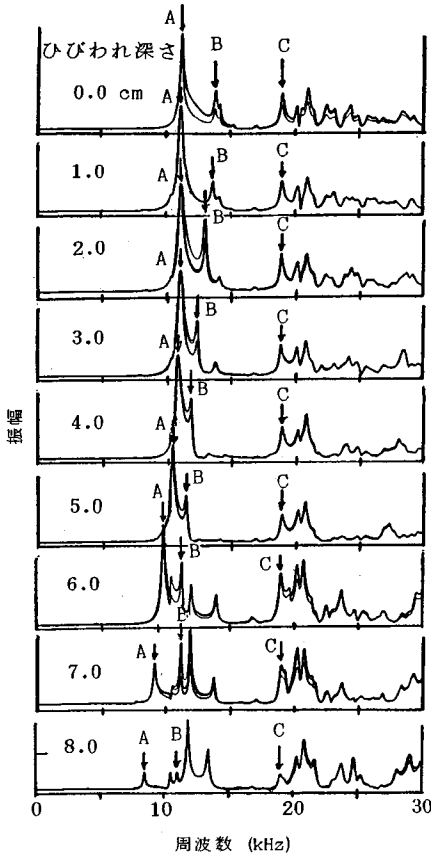


図-9 W/C=45%のコンクリートにおけるひびわれ深さ h の増加に伴う応答スペクトルの変化状況

d の約 $1/2$ 付近より浅いときはピーク周波数の変化が非常に小さいが、 h が約 $d/2$ より大きくなると急激に低周波数側へ移動するとともに、ピーク振幅も低下している。ピーク B は初めに約 14 kHz 付近にあり、 h が約 $d/2$ 程度までは大きな割合で低周波数側へ移動するが、 h が約 $d/2$ より大きくなると h の増加に伴うピーク周波数の変化量が小さくなり、振幅もまた小さくなっている。ピーク C は h の変化に関係なく常に約 19 kHz 付近にあってほとんど動かない。このような傾向は $W/C=55, 65\%$ の場合においても同様であり、これより次のことがわかる。すなわち、応答スペクトル上のピークには、その周波数が h の変化に敏感なものと鈍感なものがあること、 h の増加の途中でピーク周波数の変化の程度が急変するものがあること、 h の増加に対しその途中より生じ、漸次振幅を増大させるものと、途中より振幅が低下するものなどがあることなどである。これは、単に一次元波動理論だけでは解決できそうにない複雑な性質である。

図-10 は配合 F, B, E, D, G, H すなわち $W/C=$

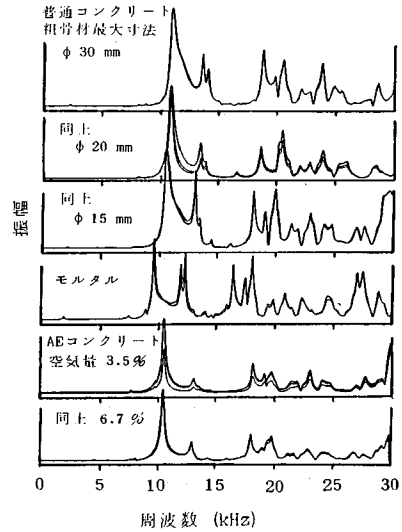


図-10 骨材寸法や空気量に変化する各種のコンクリートにおける無ひびわれ部材の応答スペクトル

55% で骨材の最大寸法および空気量に変化する場合の、 $10 \times 7.5 \times 40$ cm の無ひびわれ供試体における応答スペクトルを示している。骨材寸法や空気量が変われば、 W/C 一定の場合でもコンクリート中の音速が変化するため、ピーク周波数も若干ずつ変化するが、それらの応答スペクトルは類似しており、図-9 のピーク A, B, C に相当するピークが存在していることがわかる。これより、これらのピークが骨材粒子や気泡の多少など、材料の相違によるものでないことがわかる。

図-11 は配合 B で、寸法 $10 \times 7.5 \times 36.5$ cm の供試体中に直径 13 mm の普通丸鋼 (SR 24) 2 本を埋め込んで造った鉄筋コンクリート部材の人工ひびわれ深さ h の増加に伴う応答スペクトルの変化状況を示している。この場合、供試体長さが若干他より短いこと、人工ひびわれが鉄筋とともに厚さ約 5 mm のスチロール樹脂板を埋め込んで設けたことなど、鉄筋の存在やひびわれ幅の相違で、その応答スペクトルの概形は無筋コンクリートの場合と若干異なるが、図-9 のピーク A, B, C に相当するピークが存在している様子がわかる。

図-12 (a), (b) は、 W/C が 45, 55, 65% と変化する場合と空気量や粗骨材寸法が変化する場合の、無ひびわれ部材のピーク A, B の周波数 f_{A0}, f_{B0} に対する、任意のひびわれ深さ h におけるピーク周波数 f_{Ah}, f_{Bh} との比 $f_{Ah}/f_{A0}, f_{Bh}/f_{B0}$ と h との関係を示したものである。両曲線はいずれの配合においてもほとんど差はなく、ほぼ 1 つの曲線で近似できることがわかる。これは、材料中の音速が違って、ひびわれ導入前後におけるこれらのピークが部材の幾何形状に基づく共振によって生じているため、その比はひびわれ深さの影響として幾何的

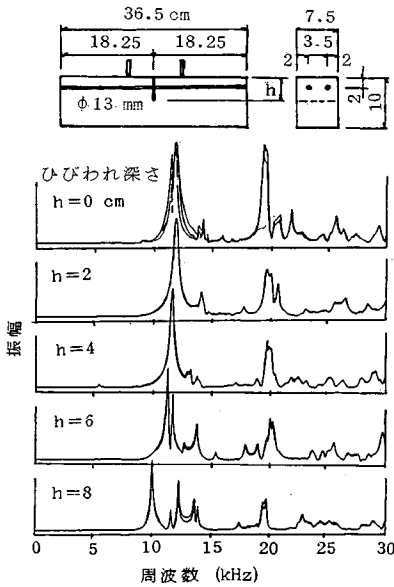


図-11 鉄筋コンクリート部材におけるひびわれ深さ h の増加に伴う応答スペクトルの変化状況

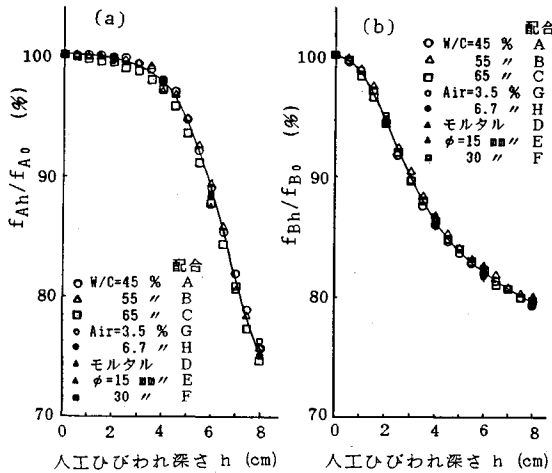


図-12 水セメント比, 空気量, 骨材寸法が異なる部材のひびわれ導入前後における, h の増加に伴う f_{Ah}/f_{A0} , f_{Bh}/f_{B0} と h の関係 (W/C 変化は h が 5 mm ごと, 骨材寸法および空気量変化は 20 mm ごとに示している)

に取り出されることを示している。すなわち, その部材を共振させている波の波速を V , 周波数を f , 波長を λ とすれば, $f = V/\lambda$ であり, ひびわれ導入前後における V は一定であるので, その周波数比は共振時の波長の比の逆数となる。共振時の波長は波の伝播経路をつかさどる部材内部の空間的な幾何形状に関係しており, その結果, ひびわれ深さの影響が周波数比に現われてくるものと考えられる。 h - f_{Ah}/f_{A0} 曲線では, h が小さい場合にはその勾配が緩やかなため, f_{Ah}/f_{A0} の値より求め

られる h の推定値には誤差が大きくなる懸念があるが, h が部材寸法の約 1/2 以上では勾配が急となるため, 逆に推定精度が良くなることが考えられる。また h - f_{Bh}/f_{B0} 曲線では, h が小さい場合にその勾配が急となり, 深くなるとやや緩やかになっている。ゆえに, 応答スペクトルから得られる数本のピーク周波数比曲線のうち, h の変化に対して大きく変化する部分を用いれば, コンクリートの材料的な相違を考慮することなくひびわれ深さが評価できることになる。つまり, 図-12 のような参照曲線が得られていれば, 舗装板や壁部材のような厚さが一定なコンクリート部材において, ひびわれのない部分とひびわれ部分で得られる応答スペクトルの比較から, ひびわれ深さを決定できる可能性を示唆している。これは, 図-11 の結果より, 鉄筋コンクリートでも適用可能であると考えられる。

図-13 は配合 B における, 部材断面が 10×7.5 cm で, 長さが 34~40 cm まで 2 cm ごとに変化する無ひびわれ部材の応答スペクトルの変化状況を示している。これより断面が同じであれば, 部材長 L が変化しても応答スペクトル上のピーク出現状況はほぼ同様の傾向を示すこと, および図-9 のピーク A, B, C に相当するピークは, L が短くなるに従ってほぼ同程度の割合で高周波数側へ移動していくことがわかる。すなわち, これらのピーク周波数は部材長さに関係していることがわかる。

図-14 は配合 B の $15 \times 15 \times 53$ cm 角柱供試体における, $h=0 \sim 8$ cm まで 2 cm ごとに変化させた場合の, 周波数領域 0~20 kHz 間の応答スペクトルの変化状況を示している。図-9 の $10 \times 7.5 \times 40$ cm 供試体の場合に比べて, ピーク出現状況がかなり異なってくるのがわかる。すなわち, $h=0$ における応答スペクトル上の約 12.5 kHz 付近には高いピークがあり, h の変化に対してほとんど動かない。また約 8 kHz と 10 kHz 付近にはその振幅は小さいがはっきりした 2 つのピークがあり, それらのピークは h の増加に対して図-9 のピーク A, B と類似した動きで低周波数側へ移動していることがわかる。ゆえに, これらのピークは図-9 のピーク A, B に相当するものと考えられる。

図-15 は配合 B で $10 \times 7.5 \times 40$ cm の供試体において, 人工ひびわれ位置 a を中央より 1~3 cm まで 1 cm ごとにずらした場合の一例として, $a=3$ cm とし, 人工ひびわれ深さ h を 0~8 cm まで 2 cm ごとに変化させた場合の応答スペクトルの変化状況を示している。ここでは示されていないが $a=1$ cm における h の増加に伴う応答スペクトルの変化状況は, $a=0$ cm の場合とほとんど変わらないが, a が大きくなるにつれてピーク出現状況がかなり変化し, $a=3$ cm では比較的大きなピークが多数現われるようになる。そのため, 図-9 のピーク

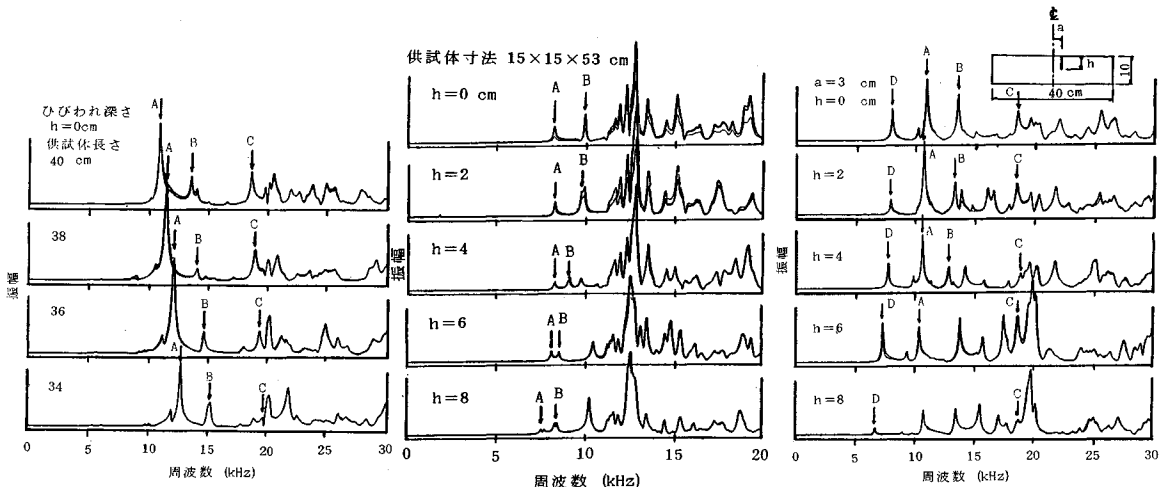


図-13 部材断面一定でその長さが変化する場合の応答スペクトルの変化状況

図-14 15×15×53 cm 供試体におけるひびわれ深さ h の増加に伴う応答スペクトルの変化状況

図-15 ひびわれ位置 $a=3$ cm の場合のひびわれ深さ h の変化に伴う応答スペクトルの変化状況

A, B, C に相当するピークの選定が難しくなり、特にピーク A に相当するピークは $h=8$ cm で、またピーク B は $h=6$ cm でほとんど消失してしまっている。その代わりに、ひびわれが中央付近にある場合には小さくてほとんどみえなかった約 9 kHz 付近のピーク D の振幅が大きくなり、 h の増加とともに順次低周波数側へ移動している様子がわかる。これは、ひびわれ位置を中心に発信および受信トランスデューサを取り付けているため、トランスデューサ取付け位置が図-9 の場合と異なり、また、ひびわれを中心とする左右の部分の部材寸法が異なってくるために、部材全体の共振モードに変化が生じるためと考えられる。しかし、このようにひびわれ位置が中央より大きく離れる場合でも、ピーク A, B とは別のピークに着目した評価を行えば、ひびわれ深さの評価は可能であることがわかる。

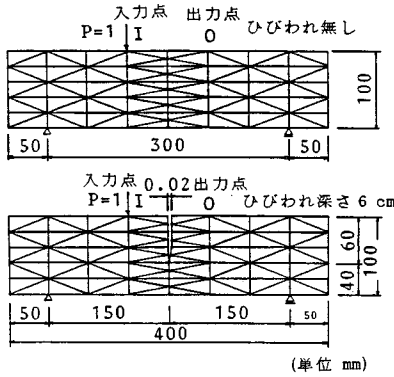
(2) 有限要素解析

ひびわれ深さの変化に対する部材の共振に基づく応答スペクトル上のピークの変化を考察するために、有限要素法 (FEM) を用いて、部材中央に垂直方向にひびわれを有する部材の、ひびわれ深さの変化に対する周波数応答の二次元共振解析を行った。この FEM 解析では三次元物体を二次元的にモデル化していることや、支点拘束条件が実際と異なるため、実験結果と必ずしも一致するとは考えられないが、ひびわれ深さの変化に対するピーク変動の傾向は把握できるものと考えた。

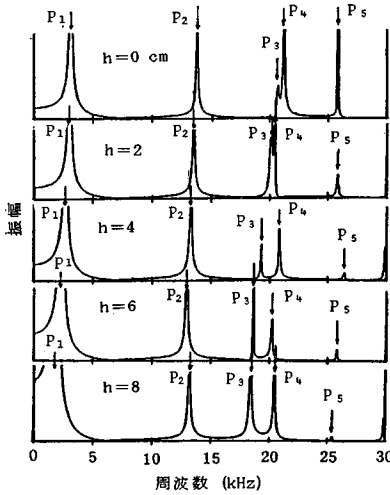
解析した部材の寸法は実験供試体に合わせて高さ 10 cm で長さ 40 cm の場合と長さが 34~40 cm まで 2 cm ごとに変化する場合とし、部材両端より部材長 L の $1/8$ の位置を単純支承で拘束した。ひびわれ位置は部材

中央とし、その深さは 0~8 cm まで 2 cm ごとに変化させて解析した。解析は実験に使用したコンクリートの材料特性をもとに、その概略値として密度 2.38 g/cm^3 、ヤング係数 $3.0 \times 10^{11} \text{ g/cm}^2$ 、ポアソン比 0.2 を選んで行った。応答解析は、単位の力 $P=1$ を、ひびわれの手前 $L/8$ の位置 I より、周波数の増分 0.1 kHz ごとに部材に与えたときの、ひびわれの反対側 $L/8$ の位置 O における部材表面に垂直方向の変位を求めた。図-16 は、本解析に用いた部材長さ 40 cm でひびわれを有しない部材と、深さ 6 cm のひびわれを有する部材の、有限要素分割状況および支点拘束条件を示している。

図-17 は長さ 40 cm で、ひびわれ深さが変化する場合の部材の周波数応答解析結果を示している。解析結果では約 3 kHz 付近に大きなピーク P_1 があり、ひびわれ深さの増加に伴って漸次大きな割合で低周波数側へ移動していることがわかる。実験で使用したプリアンプとディスクリミネータは約 10 kHz 以下の周波数に対して感度の劣るものを使用しているため、このような低周波数領域のピークは検出できなかった (図-2 参照)。約 13 kHz 付近より高い周波数領域には大小の振幅をもつピーク P_2, P_3, P_4, P_5 が存在している。 P_2 は $h=8$ cm で $h=6$ cm の場合より周波数が高くなっているが、全体的には h の増加に対して低周波数側へ移動している。 P_3 はひびわれ深さの増加に伴ってピーク周波数が急速に低下してくる様子がわかる。 P_4 はひびわれ深さの増加に伴うピーク出現位置がやや不安定であり、また P_5 は $h=4$ cm で他の場合より若干高くなっているが、全体的には約 25 kHz 付近でほとんど定位置にある。これらのピーク P_2, P_3, P_5 は、実験で得たピーク A, B, C

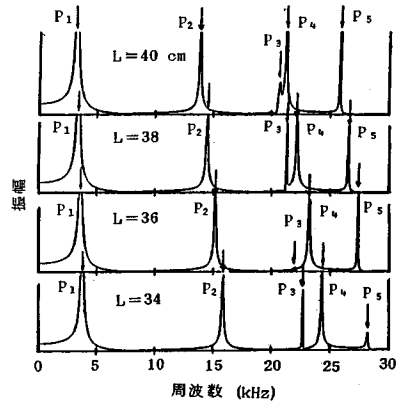


図—16 有限要素分割状況の一例と支点拘束条件



図—17 FEM 解析に基づく部材長 L 一定の場合のひびわれ深さ h の増加に伴う周波数応答の変化状況

とはピーク周波数の値が少々異なるため、完全な対応はしていないが、傾向的には図—9 に非常に良く類似した

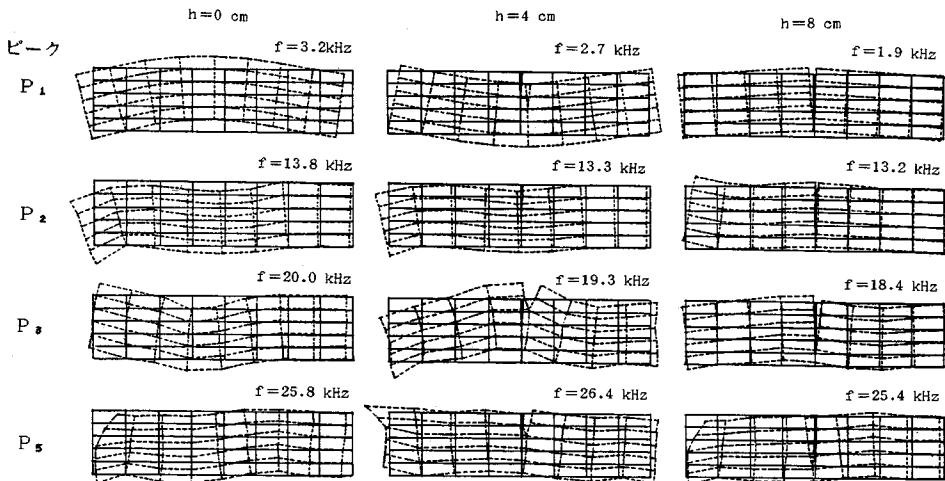


図—18 FEM 解析に基づく無ひびわれ部材の部材長 L の変化に伴う周波数応答の変化状況

ものとなっている。FEM 解析では要素数の多少によりピークの発生数やピーク周波数が若干異なってくる。ゆえに、解析結果を実験値に近づけるには、さらに細かな要素分割や拘束条件の改良、あるいは三次元解析を行うなどの必要性があると考えられる。

図—18 は部材長さ L が 40~34 cm まで 2 cm ごとに変化するひびわれを有しない部材の応答解析結果を示している。 L が短くなるにつれて、すべてのピークがほとんど同じ割合で順次高周波数側へ移動しており、傾向としては実験結果 (図—11) と良く一致していることがわかる。すなわちこれらのピークは部材長さに支配されており、その長さに応じた部材の共振によって生じていることがわかる。

図—19 は部材寸法 10×40 cm で、ひびわれを有しない部材とひびわれ深さが 4 cm と 8 cm の部材の P_1, P_2, P_3, P_5 における共振モードと共振周波数を示している。



図—19 FEM 解析における $L=40$ cm で $L=0, 4, 8$ cm の場合のピーク P_1, P_2, P_3, P_5 の共振モード

各図はピーク振幅の大小に応じて拡大率を調整して示している。各部材とも、各ピークにおける変形モードは類似しており、曲げ振動や縦振動あるいはその複合型と考えられる種々のモードがあることがわかる。特に P_2 や P_3 , P_4 では支点の影響と考えられる無理な変形が起こっている様子がわかる。実験では供試体を横にしてその両端より約 5 cm の位置に 3×3 cm の木片を敷いて測定したが、解析で使用しているほどの支点の効果はないものと考えられる。その理由は、発信および受信トランスデューサを固定したまま木片の位置を変えて測定しても得られる応答スペクトルは全く同じであったからである。すなわち供試体は自由共振をしていることが考えられる。このような解析上の仮定と実際のとの相違もピーク周波数に影響したと考えられる。

4. 結 論

(1) スイープモードを利用した応答スペクトルとフーリエスペクトルは等価である。応答スペクトルの計測システムは簡単な装置で任意の周波数帯域を容易に測定できるので、経済性や操作性に優れており、コンクリートの物性評価法として期待できる。本方法ではスイープ時間を 5 秒以上とするのが良く、また、AE トランスデューサとコンクリート表面間に適当な軟らかさの結合材を挿入することにより、応答スペクトルの再現性をかなり改善できる。

(2) 人工ひびわれを有する部材の応答スペクトル上には、ひびわれ深さに関する情報を含んだいくつものピークがある。それゆえ、これらの特性を利用して部材に生じた実際のひびわれ欠陥を評価することが可能であると考えられる。応答スペクトル上に出現するピークはひびわれも含めた部材の幾何形状に基づく共振に関係しており、材料の相違に基づく影響は少ない。

(3) 有限要素法によるひびわれを有する部材の共振解析結果では、ひびわれ深さの変化や部材長さの変化に対するピーク出現傾向は実験結果とほぼ類似しており、また、ひびわれ深さの変化に伴う相対する一連のピークは、それぞれ同じモードで共振していることがわかった。

最後に、本方法は無筋コンクリートにも鉄筋コンクリートにも使用可能であり、部材形状寸法の定まったブロック製品や壁部材あるいは床板のような部材厚一定のものに対しては、無欠陥部材と欠陥部材、あるいは無欠陥部と欠陥部で得られた応答スペクトルの形状比較やピーク周波数比を用いて、ひびわれ深さや欠陥の位置、大きさなどを効果的に評価することが期待できる。

謝 辞：本論文をまとめるにあたって、貴重なご助

言、ご指導を賜りました東海大学の君島博次教授に、この席を借りて厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) コンクリート工学編集委員会：特集 コンクリートとひびわれ，コンクリート工学，Vol. 20, No. 11, 1982. 11.
- 2) 岡田 清・六車 照：コンクリートハンドブック，朝倉書店，pp. 499～555, 1985. 6.
- 3) Bradfield, G. and Woodroffe, E. P. H. : Determining the Thickness of Concrete Pavement by Mechanical Waves, Direct-beam Method, Mag. of Concrete Research, pp. 16～46, 1964.
- 4) Chung, H. W. and Laur, K. S. : Diagnosing in situ Concrete by Ultrasonic Pulse Technique, Concrete International, pp. 42～49, Oct. 1983.
- 5) Knab, L. T., Blessing, G. V. and Clifton, J. R. : Laboratory Evaluation of Ultrasonics for Crack Detection in Concrete, ACI Journal, pp. 17～27, Jan./Feb. 1983.
- 6) Cady, P. D., Weyers, R. E. and Wilson, D. T. : Durability and Compatibility of Overlays and Bridge Deck Substrate Treatments, Concrete International, pp. 36～43, June 1984.
- 7) 秋鹿為之：衝撃波および音波によるコンクリート構造物の欠陥検出，コンクリート構造物の非破壊試験，日本技術検査協会，July 1985.
- 8) 尼崎省二：コンクリートの表面ひび割れ深さの超音波による測定精度，非破壊検査，Vol. 34, No. 10, pp. 743～749, Oct. 1985.
- 9) Gericke, O. R. : Determination of the Geometry of Hidden Defects by Ultrasonic Pulse Analysis Testing, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 35, No. 3, pp. 364～368, 1963.
- 10) 尼崎省二・明石外世樹・高木宣章・平野博範：超音波スペクトロスコーピーのコンクリート工学への適用に関する基礎研究，土木学会第 41 回年次，pp. 121～122, Nov. 1986.
- 11) Carino, N. J., Sansalone, M. and Hsu, N. N. : Flaw Detection in Concrete by Frequency Spectrum Analysis of Impact-Echo Waveforms, International Advances in Nondestructive Testing, pp. 1～30, Jan./Feb. 1986.
- 12) Sansalone, M. and Calino, N. J. : Detecting Honeycombing, the Depth of Surface-opening Cracks, and UngROUTED Ducts, Concrete International, pp. 38～46, April 1988.
- 13) 山田和夫・小阪義夫：火害を受けたコンクリート中を伝播する超音波の減衰特性に関する研究，第 10 回コンクリート工学年次，Vol. 10, No. 2, pp. 361～366, 1988.
- 14) 坂田康徳・大津政康：弾性波フィルター特性によるコンクリートのひびわれ評価法に関する基礎研究，コンクリート工学，Vol. 24, No. 7, pp. 135～145, July 1986.
- 15) 近藤次郎：フーリエ変換とその応用，培風館，1975.
- 16) ASTM E-7 委員会：AE センサー応答の再現性を決定するための標準指針，ASTM 指針，E976-84, May 1984. (1989. 3. 6・受付)