

# 弾性波法を適用したコンクリート内部の 空隙および鉄筋位置の推定 に関する実験的研究

山田 和夫

## Experimental Study on Non-destructive Estimation of Location of Void and Steel Bar in Concrete by Elastic Wave Method

Kazuo YAMADA

In this study, the elastic wave method was applied to estimate the location of void and steel bar, as the fundamental investigation to establish a new non-destructive technique predicted from the frequency characteristics of elastic wave propagating through concrete. Following results were obtained in the present study:

- 1) The locations of voids and steel bars can be most accurately estimated by using a resonance technique among three types of techniques applied in this experiment (resonance technique, ultrasonic pulse-echo technique and ultrasonic pitch-catch technique).
- 2) The frequency components in the range of 200-250 kHz of the frequency transfer function become prominent with increasing the accuracy to predict the thickness of cover mortar for steel bar.
- 3) The amplitude and energy of the measured waveform increase, and the ultrasonic pulse-echo is detected more easily with the increase of diameter and the decrease of thickness of cover mortar for void.

### 1. はじめに

昨今、高度成長期に建設された既設コンクリート構造物の早期劣化に関わる諸問題が社会的な関心を集めており、関連する学・協会においても、既設コンクリート構造物の維持管理の方法、あるいは耐久的な構造物の設計・施工方法に関する委員会を設けて、この種の問題に関する多方面からの検討を行っている。このような社会的背景から、最近コンクリートの非破壊試験方法が再び関心の的となってきた。従来、コンクリートの非破壊試験は、コンクリートの強度推定を目的としたものが多かったが、

建築学科

近年は構造物の劣化度診断とも関連して、コンクリート内部のひび割れ、空隙や欠陥、含水状態、鉄筋の位置、直径および腐食状態、仕上げ材の剥離状態などといった強度以外の内部探査の方法も重要となってきた。筆者も、従来から弾性波法を適用したコンクリートの非破壊試験方法を確立するための一連の基礎的研究[1-8]を行ってきたが、本研究は、それら一連の研究の延長上のもので、コンクリート中の空隙および鉄筋に対する内部探査を対象として実験的に検討を行ったものである。

### 2. 実験方法

2.1 実験の概要

本実験では、各試験体中を伝播した超音波の諸特性を測定し、それらの特性値とコンクリート中に存在する空隙または鉄筋との関係を調査した。本実験で取り上げた要因は、介在物の種類（空隙および鉄筋の2種類）、介在物の直径（ $d = 6.0, 12.8, 21.9$ および $39.9\text{mm}$ の4種類）、かぶり厚さ（ $t = 9, 24, 44\text{mm}$ の3種類（ただし、各試験体とも対面側からの計測も行った））、探査の方法（反射法、透過法および共振法の3種類）、変換子の設置位置（反射法では変換子を介在物の主軸方向と直角に変換子を設置し、変換子の間隔を介在物の頂点となす角度（頂角）が $54$ 度となる位置（反射法(A)）および介在物を挟んで間隔が $50\text{mm}$ となる位置（反射法(B)）の2種類、透過法では表面に介在物が存在しない相対する試験体面の中央位置の1種類、共振法では変換子同士が触れない程度の位置の1種類（変換子は介在物の主軸方向と直角に設置））、並びに変換子の接着方法（両面テープおよびグリースの2種類）である。なお、試験体としては水セメント比（ $W/C$ ）が $60\%$ のモルタルを用いた。

2.2 試験体の製作および養生方法

試験体の製作には、普通ポルトランドセメント、天竜川産の川砂（表乾比重 $= 2.60$ 、最大粒径 $= 5\text{mm}$ ）を用いた。本実験で用いた標準調合表を表-1に示す。試験体は、いずれも $10(\text{縦}) \times 10(\text{横}) \times 9(\text{奥行き})\text{cm}$ の直方体とし、打設後 $24$ 時間目に脱型し、その後

表-1 調合表

| W/C (%) | 標準調合 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) |      |      | フロー値 |
|---------|---------------------------------|------|------|------|
|         | 水                               | セメント | 砂    |      |
| 60      | 352                             | 587  | 1174 | 298  |

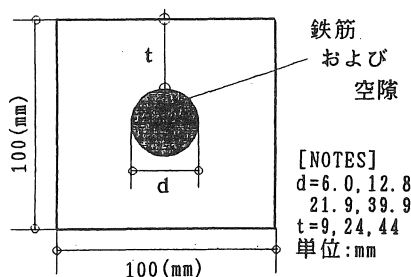


図-1 試験体の概要

直ちに温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 $80 \pm 5\%$ の養生室内で4週間空中養生を行った。試験体の個数は、各要因毎に1個とした。試験体の概要を、図-1に示す。

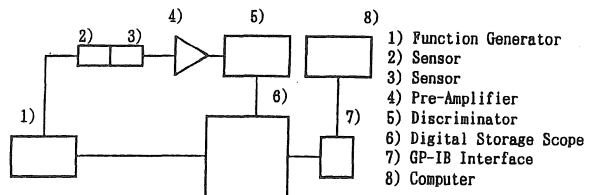
2.3 計測・処理方法

本実験で採用した計測方法のうち、反射法と透過法については、前報[3]と同様の計測・処理方法を使用し、入力パルス幅を $2.5\mu\text{sec}$ とした。ただし、本実験では、超音波の到達時間に着目したかぶり厚さの推定も行った。使用した計測システムのブロックダイアグラムを図-2に示す。また、本実験で採用した共振法は、原理的にはまず発振周期が可変の超音波パルスをコンクリートに入力し、次に検出された励振部の残存波と反射波による合成波をFFTアナライザーでフーリエ解析することによって反射波のみを抽出し、超音波の到達時間を求めようとするもので、 $1$ 次共振周波数 $f$ と反射波の到達時間 $t$ との間に、 $t = 1/f$ の関係があることを利用して算定する方法である。

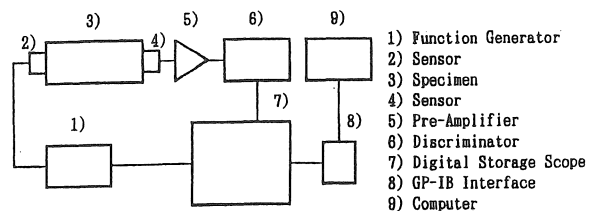
3. 実験結果とその考察

3.1 かぶり厚さの推定結果

表-2は、各種方法を用いてかぶり厚さを推定した結果の代表的なものを一覧表にして示したものである。この表によれば、介在物の種類や径にかかわらず共振法による推定精度が最も優れていることが分かる。ただし、かぶり厚さが $40\text{mm}$ 以下の場合には、今回使用したポータブルFFTアナライザーの性能



(a) 変換子を含む計測システムの伝達関数算定用



(b) 変換子を含む計測システムと媒体の伝達関数算定用

図-2 計測システムのブロックダイアグラム

表-2 代表的なかぶり厚さの推定結果

| 種類        | 介在物<br>直 径<br>φ (mm) | かぶり<br>厚 さ<br>t (mm) | 反射法(A)      |             | 反射法(B)      |             | 透過法         |             | 共振法         |             | 平均誤差 (%) |          |      |
|-----------|----------------------|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|----------|------|
|           |                      |                      | 推定値<br>(mm) | 誤 差<br>(mm) | 推定値<br>(mm) | 誤 差<br>(mm) | 推定値<br>(mm) | 誤 差<br>(mm) | 推定値<br>(mm) | 誤 差<br>(mm) | 直径別      | かぶり<br>別 | 種類別  |
| 鉄筋        | 6.0                  | 24                   | 22          | -2          | 40          | 16          | 50          | 26          | *           | *           | 61.1     | 69.0     | 42.9 |
|           | 12.8                 |                      | 29          | 5           | 49          | 25          | 47          | 23          | *           | *           |          |          |      |
|           | 21.9                 |                      | 29          |             | 33          |             | 62          |             | *           | *           | 72.2     |          |      |
|           | 6.0                  | 44                   | 51          | 7           | 43          | -1          | 47          | 3           | 44          | 0           | 6.3      | 16.7     |      |
|           | 12.8                 |                      | 41          | -3          | 49          | 5           | 54          | 10          | 52          | 9           |          |          |      |
|           | 21.9                 |                      | 25          | -19         | 28          | -15         | 58          | 14          | 49          | 9           | 18.0     |          |      |
| 平均誤差 (%)  |                      |                      | 20.1        |             | 34.8        |             | 55.9        |             | 8.3         |             |          |          |      |
| 空隙        | 6.0                  | 24                   | 33          | 9           | 53          | 29          | 42          | 18          | *           | *           | 77.8     | 56.5     | 34.6 |
|           | 12.8                 |                      | 24          | 0           | 51          | 27          | 37          | 13          | *           | *           |          |          |      |
|           | 21.9                 |                      | 28          |             | 40          |             | 30          |             | *           | *           | 36.1     |          |      |
|           | 6.0                  | 44                   | 45          | 1           | 51          | 7           | 44          | 0           | 47          | 3           | 6.3      | 12.7     |      |
|           | 12.8                 |                      | 41          | -3          | 40          | -4          | 35          | -9          | 52          | 9           |          |          |      |
|           | 21.9                 |                      | 49          | 5           | 51          | 5           | 27          | -17         | 47          | 9           | 18.2     |          |      |
| 平均誤差 (%)  |                      |                      | 10.8        |             | 44.1        |             | 30.9        |             | 10.6        |             |          |          |      |
| 全平均誤差 (%) |                      |                      | 15.5        |             | 39.5        |             | 43.4        |             | 9.5         |             |          |          |      |

[注] 反射法(A)：頂角が54度となるように変換子を設置した場合、  
反射法(B)：間隔が5cmとなるように変換子を設置した場合。

上の限界のために測定が不可能であった。これに対して、反射法では頂角が54度となるように二つの変換子を設置した場合（反射法(A)）の推定精度がよく、共振法との差もほとんど認められないが、変換子の設置間隔を50mmとした場合（反射法(B)）には推定精度はやや劣っている。このことは、かぶり厚さを精度よく推定するためには、超音波の反射角度

を最適な角度にする必要のあることを示唆している。また、推定精度は、かぶり厚さが大きくなるほど向上しており、かぶり厚さが極端に小さい場合になると、推定精度は著しく低下した。なお、かぶり厚さの推定精度は鉄筋よりも空隙の方が優れているが、介在物の径の影響については明確な傾向は得られなかった。一方、透過法による推定精度は、今回の実験方法の中では最も劣っているが、介在物が空隙の場合には、鉄筋に比べて推定精度がよいのが分かる。

3.2 検出超音波の減衰特性

前節で示した結果のうち、かぶり厚さの推定精度が悪いものは、介在物からの反射波が正確には捉えられていないものと思われるため、ここでは推定精度が比較的好かった反射法で、頂角が54度となるように変換子を設置した場合（反射法(A)）について検討を行うことにする。

図-3は検出した波形の一例で、(a)は鉄筋径が40mm、(b)は空隙径が21.9mmの場合の結果である。図-3(a)によれば、3つの反射波を観察することができるが、これらの波がどこから反射してきたものを伝播距離および超音波速度を用いて推定すると、第1反射波が鉄筋位置、第2反射波が底面からの反射波に対応する。また、図-3(b)では、2つの反射波を観察できるが、第1反射波が空隙位置、第2反射波が底面からの反射波にそれぞれ対応している。

図-4は、検出波形の各種特性パラメータのうち、最大振幅 (AMPmax) およびエネルギー (Et) と介在

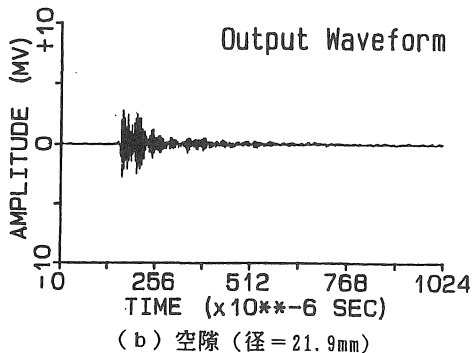
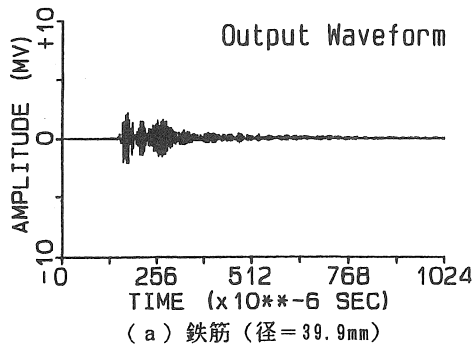


図-3 検出波形の一例 (反射法(A)、かぶり厚さ=44mm)

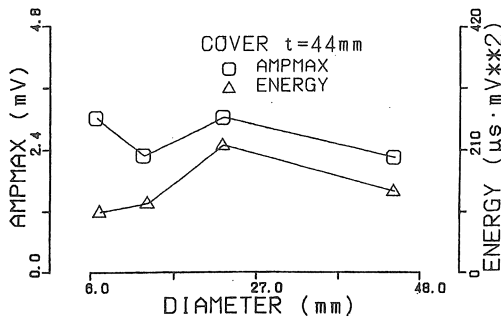


図-4 検出波形の最大振幅およびエネルギー（反射法(A)、鉄筋）

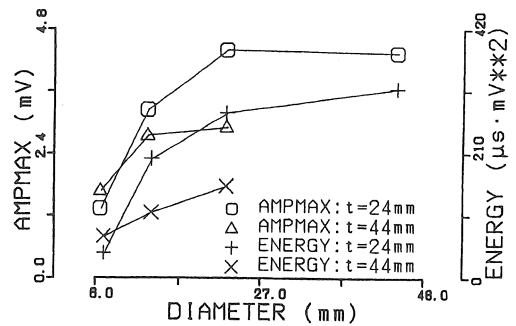


図-5 検出波形の最大振幅およびエネルギー（反射法(A)、空隙）

物の径との関係、かぶり厚さが44mmで介在物が鉄筋の場合について示したものである。図によれば、鉄筋径が21.9mmの場合を除けば、鉄筋径が大きくなるとともに最大振幅は徐々に減少し、エネルギーは逆に増加する傾向にあるのが分かる。なお、鉄筋径が21.9mmの場合に最大振幅およびエネルギーが大きくなっているのは、かぶり厚さの推定結果が実際のかぶり厚さよりも43%小さくなっていたことから推察されるように、弾性波が鉄筋よりも浅い位置に存在する何らかの介在物から反射したことによるものと考えられる。

ところで、鉄筋からの反射波が正確に捉えられているならば、かぶり厚さが同じ場合、鉄筋径が大きくなるほど鉄筋からの反射が生じやすくなるため、最大振幅およびエネルギーは増大するものと思われ

るが、図-4によれば、径の変化に依存する上記のような傾向は明確には認められていない。いま、検出波の最大振幅時点が底面からの反射波の到達時刻であるものと仮定すれば、その到達時間はかぶり厚さが9mmの場合に59.8μsec、24mmの場合に60.2μsec、44mmの場合に61.2μsecとなる。しかし、前掲の図-3(a)（ただし、パルス入力時点が128μsec）によれば、上記の各時刻以前に伝播波が検出されている。したがって、検出波には鉄筋の頂点から反射している波だけではなく、鉄筋とモルタルの界面を伝播した後反射したものや鉄筋内部を伝播しその後底面に到達して反射した波、骨材や空隙などから反射した波なども含まれていることが考えられる。

これに対して、介在物が空隙の場合の結果を示した図-5によれば、検出波の最大振幅およびエネルギーは、空隙の径が大きくなるほど増加している。これは、前掲の図-3(b)からもわかるように、空隙からの反射波が明確に検出できていたことによるものと思われる。また、最大振幅およびエネルギーは、かぶり厚さが22mmの場合よりも44mmの方が小さくなっている。これは、かぶり厚さが大きくなると超音波の伝播距離が長くなるため、超音波が減衰することによるものと考えられる。

表-6 50kHz毎の周波数帯域における周波数伝達関数のエネルギー成分比（反射法(A)、かぶり厚さ=24mm）

| 空隙径 (mm) | 各周波数帯 (kHz単位) におけるエネルギー成分比 |        |         |         |         |         |
|----------|----------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|
|          | 10-50                      | 50-100 | 100-150 | 150-200 | 200-250 | 250-300 |
| 6.0      | 0.0689                     | 0.0689 | 0.1033  | 0.1952  | 0.4374  | 0.1263  |
| 12.8     | 0.0118                     | 0.0118 | 0.0354  | 0.2995  | 0.4925  | 0.1490  |
| 21.9     | 0.0238                     | 0.0387 | 0.1181  | 0.4176  | 0.3294  | 0.0724  |
| 39.9     | 0.0129                     | 0.0294 | 0.1084  | 0.4479  | 0.3533  | 0.0481  |

表-7 50kHz毎の周波数帯域における周波数伝達関数のエネルギー成分比（反射法(A)、空隙径=21.9mm）

| かぶり厚さ (mm) | 各周波数帯 (kHz単位) におけるエネルギー成分比 |        |         |         |         |         |
|------------|----------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|
|            | 10-50                      | 50-100 | 100-150 | 150-200 | 200-250 | 250-300 |
| 9          | 0.1453                     | 0.1433 | 0.1095  | 0.0418  | 0.4247  | 0.1354  |
| 24         | 0.0238                     | 0.0387 | 0.1181  | 0.4176  | 0.3294  | 0.0724  |
| 44         | 0.0301                     | 0.1093 | 0.1995  | 0.1530  | 0.3004  | 0.2077  |

3.3 試験体の周波数応答の減衰特性  
前節と同様に、本節でも反射法で頂角が54度とものなるように変換子を設置した場合の結果について検討を行うことにする。

表-3および表-4は、それぞれ介

表-3 50kHz毎の周波数帯域における周波数伝達関数の相対最大振幅 (反射法(A)、かぶり厚さ=44mm)

| 鉄筋径<br>(mm) | 各周波数帯 (kHz単位) における相対最大振幅 |        |         |         |         |         |
|-------------|--------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|
|             | 10-50                    | 50-100 | 100-150 | 150-200 | 200-250 | 250-300 |
| 6.0         | 0.0342                   | 0.0669 | 1.0000  | 0.4802  | 0.1412  | 0.0206  |
| 12.8        | 0.0831                   | 0.1872 | 0.6862  | 0.8623  | 1.0000  | 0.0076  |
| 39.9        | 0.0673                   | 0.1387 | 0.4533  | 0.6209  | 1.0000  | 0.1536  |

表-4 50kHz毎の周波数帯域における周波数伝達関数のエネルギー成分比 (反射法(A)、かぶり厚さ=44mm)

| 鉄筋径<br>(mm) | 各周波数帯 (kHz単位) におけるエネルギー成分比 |        |         |         |         |         |
|-------------|----------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|
|             | 10-50                      | 50-100 | 100-150 | 150-200 | 200-250 | 250-300 |
| 6.0         | 0.0036                     | 0.0226 | 0.6166  | 0.3049  | 0.0505  | 0.0018  |
| 12.8        | 0.0086                     | 0.0454 | 0.1469  | 0.3608  | 0.4297  | 0.0086  |
| 39.9        | 0.0059                     | 0.0293 | 0.1405  | 0.2479  | 0.5198  | 0.0566  |

表-5 50kHz毎の周波数帯域における周波数伝達関数のエネルギー成分比 (反射法(A)、鉄筋径=39.9mm)

| かぶり厚さ<br>(mm) | 各周波数帯 (kHz単位) におけるエネルギー成分比 |        |         |         |         |         |
|---------------|----------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|
|               | 10-50                      | 50-100 | 100-150 | 150-200 | 200-250 | 250-300 |
| 9             | 0.0052                     | 0.0183 | 0.6150  | 0.1507  | 0.1672  | 0.0436  |
| 24            | 0.0049                     | 0.0507 | 0.2305  | 0.4736  | 0.2256  | 0.0147  |
| 44            | 0.0059                     | 0.0293 | 0.1405  | 0.2479  | 0.5198  | 0.0566  |

在物が鉄筋にかぶり厚さが44mmのモルタルの周波数伝達関数の最大振幅およびエネルギーを、50kHzの周波数帯域毎に分類して示したものである。なお、これらの表に示した値は、いずれも10~300kHzの全周波数領域における最大振幅およびエネルギーで除して無次元化してある。これらの表によれば、最大振幅およびエネルギーは、鉄筋径が大きくなってかぶり厚さの推定精度が向上するほど、200-250kHzの高周波数成分が次第に卓越する傾向にあるのが分かる。また、表-5は、周波数伝達関数のエネルギーに及ぼすかぶり厚さの影響を鉄筋径が39.9mmの場合について示したものであるが、この表においても、かぶり厚さが大きくなって推定精度が良くなるほど、200-250kHzの周波数成分が増加する傾向を示している。

一方、表-6は、周波数伝達関数のエネルギーに及ぼす空隙径の影響を、かぶり厚さが24mmの場合について示したものである。この表によれば、空隙径が大きくなるほどに200kHz以上の高周波数成分は次第に減衰し、200kHz以下の周波数成分が増加する

傾向を示すことが分かる。また、表-7は、周波数伝達関数のエネルギーに及ぼすかぶり厚さの影響を空隙径が21.9mmの場合について示したものである。この表からはあまり明確な傾向は認められないが、特記すべき事項として、かぶり厚さが最も小さい9mmの場合、10~50kHzの低周波数成分が他のかぶり厚さの場合に比べて著しく卓越していることが挙げられる。これは、おそらくかぶり部の薄いモルタル層で膜振動が生じているためと思われる。

#### 4. 結論

本研究では、弾性波法を適用したコンクリートの非破壊試験方法を確立するための基礎的研究として、弾性波法による空隙および鉄筋の位置推定の可能性について検討を行った。本研究で得られた結果を要約すると、およそ次のようにまとめられる。

1) 空隙および鉄筋のかぶり厚さの推定精度は、本実験で採用した測定方法の中では共振法が最も優れていた。また、反射法を適用してかぶり厚

さを精度よく推定するためには、超音波の反射角度を最適な角度となるようにする必要がある。透過法による空隙位置の推定精度は、反射法の場合と同程度であるが、鉄筋位置の推定精度はあまり期待できない。

- 2) 鉄筋径が増加しかぶり厚さの推定精度が向上するに伴って、モルタルの周波数応答特性は、200～250kHzの周波数成分が卓越した特性へと移行する。
- 3) 空隙径の増加およびかぶり厚さの減少に伴って、検出超音波の最大振幅およびエネルギーは増加し、空隙からの反射波の検出が容易となる。

#### [謝辞]

実験およびデータ整理に際して御助力を得た愛知工業大学大学院生の山本正岳君、並びに愛知工業大学学部学生の太田純一君、岡田直人君および垣内一宏君に対して謝意を表します。また、本研究費の一部は、内藤科学技術振興財団および石田財団の研究助成金によったことを付記し、謝意を表する。

#### [引用文献]

- 1) 山田和夫・土屋宏明・小阪義夫：超音波スペクトロスコープによるコンクリートの劣化度評価に関する基礎的研究、材料、第431号、pp.956-965、1989
- 2) 山田和夫・小阪義夫：超音波スペクトロスコープによるアルカリ骨材反応を受けたモルタルの劣化度評価、日本建築学会東海支部研究報告集、第28号、pp.45-48、1990.2
- 3) 山田和夫・小阪義夫：アルカリ骨材反応を生じたモルタル中を伝播した超音波の減衰特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第12巻、第1号、pp.773-788、1990.6
- 4) 山田和夫・小阪義夫：超音波スペクトロスコープ法によるコンクリートの劣化度評価に関する研究、第43回セメント技術大会講演集、第43巻、pp.352-357、1990.5
- 5) 山田和夫・小阪義夫・山本正岳：超音波スペクトロスコープによるコンクリートの劣化度評価に関する研究（その3：アルカリ骨材反応を生じたモルタルの場合）、日本建築学会大会学術講演梗概集A（中国）、pp.205-206、1990.10
- 6) 山田和夫・小阪義夫・山本正岳：超音波スペクトロスコープによるコンクリートの劣化度評価に関する研究（その4：繰返し外力を受けたコンクリートの場合）、日本建築学会大会学術講演梗概集A（中国）、pp.207-208、1990.10
- 7) 山田和夫・小阪義夫・山本正岳：超音波スペクトロスコープによるコンクリートの劣化度評価に関する研究（その5：極低温化に曝された水中養生コンクリートの場合）、日本建築学会大会学術講演梗概集A（中国）、pp.209-201、1990.10
- 8) 山田和夫・山本正岳：弾性波法を適用したコンクリート内部探査に関する実験的研究、日本建築学会東海支部研究報告集、第29号、pp.57-60、1991.2
- 9) 山口哲夫：新しいコンクリートの厚さ測定法と測定装置、非破壊検査、第39巻、第3号、pp.217-222、1990

受理 平成3年3月20日