

論文 金属磁歪素子を用いた低周波弾性波による実大 RC 床版供試体の非破壊評価

服部 晋一*1・鎌田 敏郎*2・竹村 泰弘*3・西田 久雄*3

要旨：低周波音響弾性波を用いたコンクリート内部診断装置の計測性能評価を、RC 床版を模擬した供試体で実施した。供試体は実大形状(400×200×20cm)で、鉄筋付近等の剥離を想定した人工欠陥(表面に対し水平に配置)を内部に設置したもので検討した。この結果、検出できる欠陥サイズ、欠陥深さ、鉄筋有無の影響を、並びに欠陥の検出には周波数応答の振幅の積分値(振動レベル)が有効なパラメータであること等を明らかにした。さらに欠陥部をビジュアルに表現する欠陥深さ推定マップの有効性を確認した。

キーワード：非破壊試験, 低周波, 音響弾性波, 金属磁歪, 欠陥評価, RC 床版

1. はじめに

音響を使ってコンクリート構造物の内部に存在する剥離、空隙等の欠陥を診断する方法として衝撃弾性波法、超音波法などがある。コンクリート構造物の診断において低周波の音響弾性波を用いるメリットは、非均質材料であるコンクリート構造物を構成する骨材、鉄筋、鉄骨による減衰や散乱の影響を受け難く、コンクリート構造物の欠陥をマクロに診断できる可能性を期待できることにある。

特に道路構造物を対象とした非破壊検査においては、RC 床版のような平板構造物が多く、このような部材に対してできるだけ交通を阻害することなく検査を行えるような欠陥検出性能の実現が重要である。

本論文では、低周波で発振効率、受信感度が高い金属系磁歪素子を適用した診断装置を用い、実大供試体にて計測性能の評価を行った結果につき報告する。本実験では、特に剥離状欠陥の診断評価を実施すべく RC 床版を模擬した実大供試体に大きさや深さを異なる種々の人工欠陥を内部に配置したもので計測を行い、欠陥評価に対する有効なパラメータ、適用限界および欠陥検出の精度を明確にした。

写真-1 に供試体外観を示す。図-1 に供試体の鉄筋構造および埋設された人工欠陥を示す。

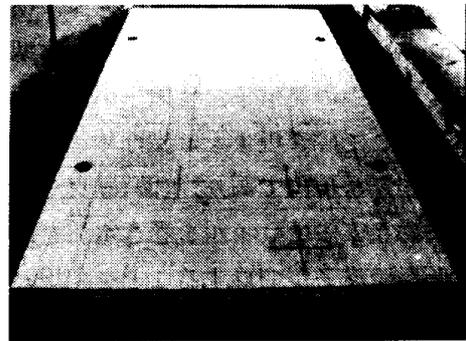


写真-1 供試体外観

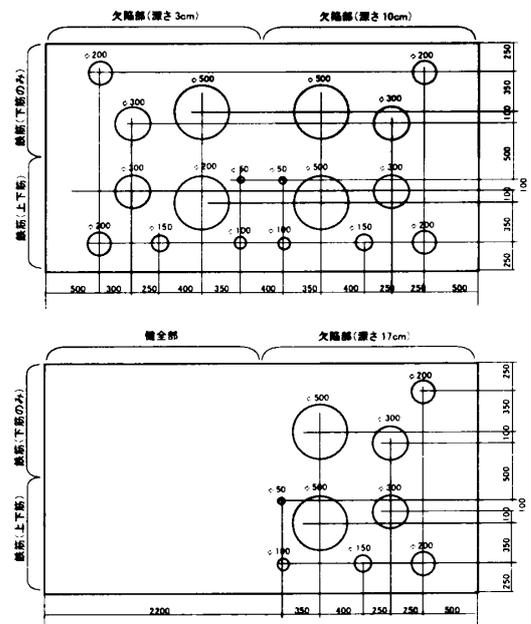


図-1 供試体欠陥構造

2. 実験概要

2.1 供試体

- *1 三菱電機(株) 産業・環境エンジニアリングセンター 工修 (正会員)
- *2 岐阜大学 工学部土木工学科助教授 工博 (正会員)
- *3 (株)オーデックス チーフエンジニア

供試体には、鉄筋付近等の剥離を想定した人工欠陥（ $t=5\text{mm}$ の発泡スチロールにて欠陥を模擬し、表面に対して水平に配置）が内部に設置されている。人工欠陥は、直径：5, 10, 15, 20, 30, 50cm で、表面からの深さがそれぞれ 3, 10, 17cm に埋設されている。また、有筋と無筋箇所が設けられており、鉄筋有無による影響を評価できる構造になっている。

2.2 装置システムの概要

写真-2 に示すシステム（一体型探査子、計測制御ユニット）を用い、この探査子に装備されている吸着機構により対象面に圧着し、一定圧以上にするにより弾性波の入射、検出感度を定レベルに保って計測できる。一体型探査子には金属磁歪の発信子、受信子が組み込まれている。ここで磁歪現象とは磁性体を磁化すると磁性体が歪む現象であり、下図(写真-2(c))のように磁歪素子にコイルを巻き電流を流すことにより磁歪素子の変形することを利用して。駆動する電流のパターンに応じて伸縮する現象を利用して発信子を構成している。

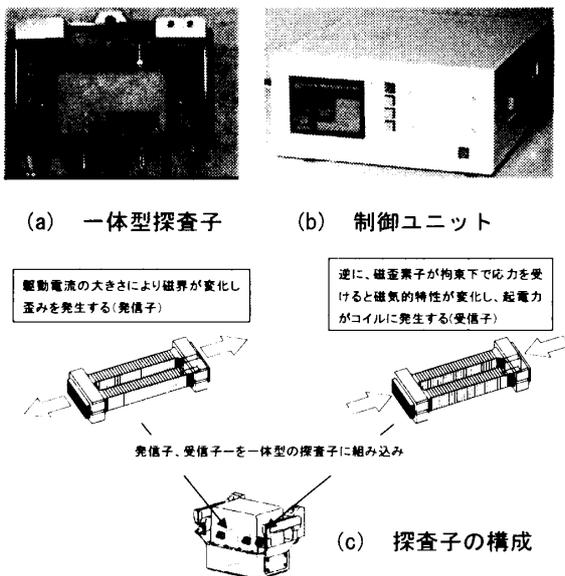


写真-2 一体型探査子と制御ユニット

一方、磁歪素子の変形を拘束した状態で外部から振動等の応力が加わると応力に応じた電流が発生する。この電流を検出することにより振動の大きさを測定することができる。この現象

を利用して発信子を構成している。

2.3 欠陥の検出原理

本装置は振動現象を介し欠陥を検出する。内部の欠陥が表面との間に形成する板構造に注目すると、想定される振動現象は下記のようなる。

- ① 表層部に欠陥が存在するケースでは、欠陥部と表面が形成する薄板構造でたわみ振動が顕著に発生する。
- ② 一方、表層部に欠陥が無く深層部に欠陥が存在するケースでは、欠陥部と表面が形成する厚板構造で縦振動が卓越する。

したがって、1kHz から 10kHz へ連続的に変化する周波数スイープ波を入力することにより、構造物を低周波から順次励起し、その応答を捉えるものである。また、このようにして得られた時間応答信号を FFT にかけることにより、構造物の周波数応答を得ることができる。本システムでは、さらに周波数応答から式(1)により帯域積分を行うことにより振動レベルを求めている（但し、たわみ振動の場合）。

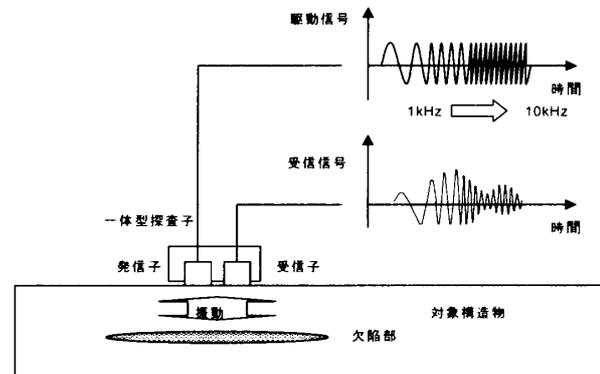


図-2 実験システムの動作

$$E = \int_{f_1}^{f_2} G(f)^2 df \quad (1)$$

ここで、 E は振幅レベル、 f_1 は積分下限周波数、 f_2 は積分上限周波数、 $G(f)$ は周波数 f における周波数スペクトルのゲインである。

2.4 計測方法

計測は、測定位置を格子状に設定し、これを走査計測し欠陥部位の検出を行った。供試体の

長軸方向を Y 軸，短軸方向を X 軸とし，欠陥深さ 3cm 部（半面）左下角を原点とした。測線は X 軸に水平方向に欠陥位置の周辺部を 10cm ピッチで設定した。計測状況を写真-3 に示す。

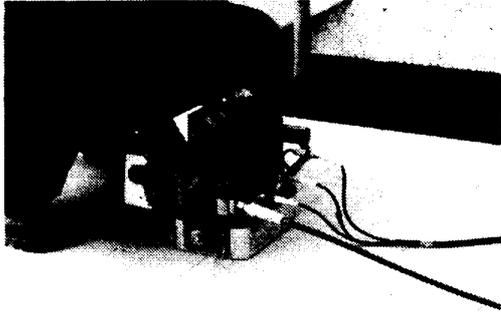


写真-3 計測状況

3. 実験結果

3.1 欠陥深さと振動レベル

供試体の人工欠陥上で計測された振動レベルを欠陥の深さをパラメータとして表-1 に示す。

表-1 欠陥深さと振動レベル

欠陥深さ [cm]	サンプル 数	振動レベル	
		平均値	標準偏差 σ
3	12	1.1	0.71
10	12	1.9×10^{-1}	1.6×10^{-1}
17	12	3.1×10^{-3}	6.7×10^{-4}

計測ポイントは，欠陥サイズ $\phi 30\text{cm}$ では中央の 2 点， $\phi 50\text{cm}$ では中央の 4 点をサンプルしている。これらのポイントにおける欠陥深さと振動レベルの相関を図-3 に示す。下部に欠陥がない部位での振動レベルは， $2 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3}$ で

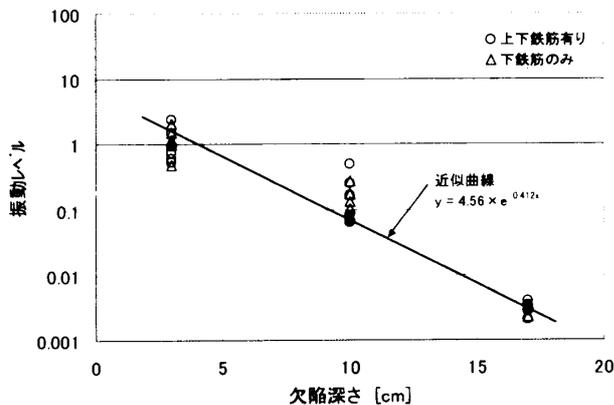


図-3 欠陥深さと振動レベルの相関

あった。図に示すように，振動レベルは欠陥深さと良好な相関を有していることがわかった。尚，両者の相関より近似曲線を求めたところ， $y = 4.56 \times e^{-0.412x}$ となった。ここで， x は振動レベル， y は欠陥深さ [cm] である。

3.2 欠陥サイズが振動レベルに与える影響

欠陥サイズが異なることによる振動レベルへの影響を図-4 に示す。振動レベルのデータは欠陥中央部のデータをサンプルした。

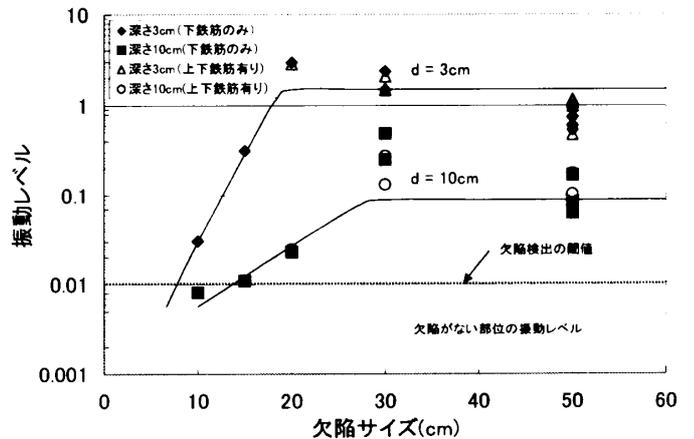


図-4 欠陥サイズと振動レベルの相関

グラフより，

(1) 欠陥深さが 3cm の場合

$\phi 50\text{cm}$ から $\phi 20\text{cm}$ までの振動レベルは大きくサイズに依存しない値を示す。さらに欠陥サイズが小さくなると $\phi 15\text{cm}$ からは低下する。 $\phi 15\text{cm}$ は $\phi 20\text{cm}$ の場合の約 $1/10$ であり，さらに $\phi 10\text{cm}$ は $\phi 20\text{cm}$ の約 $1/100$ に低下する。

(2) 欠陥深さが 10cm の場合

$\phi 50\text{cm}$ から， $\phi 30\text{cm}$ までの振動レベルは大きくサイズに依存しない値を示す。さらに欠陥サイズが小さくなると $\phi 20\text{cm}$ から低下する。 $\phi 20\text{cm}$ は $\phi 30\text{cm}$ の場合の約 $1/5$ であり，さらに $\phi 10\text{cm}$ は $\phi 30\text{cm}$ の約 $1/12$ に低下する。

以上より，同一深さの欠陥では，欠陥サイズがある大きさより小さい場合は，振幅レベルは欠陥サイズに応じて小さくなること。

また欠陥サイズがある大きさより大きくなると，振幅レベルはほぼ一定レベルとなること。この一定レベルの値は欠陥深さが浅い程大きい

ことがわかる。

図-4中の相関曲線は、振動レベルが徐々に増加する領域においては指数近似で、また振動レベルがほぼ頭打ちとなる範囲においてはその平均値（一定置）にて表すこととした。

3.3 欠陥検出レベル

供試体の健全な箇所での振動レベルは $2 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3}$ のため、本供試体において欠陥を検出できる振動レベルの閾値は、健全レベルの上限の2倍強の 1×10^{-2} とした。欠陥深さと振動レベルの相関（表-1、図-3）より欠陥深さ3cm、10cmの振動レベルは、健全な箇所の振動レベルに対し1桁以上のレベル差があり、有意に欠陥の検出が可能である。

上記の閾値を基に、欠陥深さに対応して検出可能な欠陥サイズは表-2のように得られた。

表-2 検出可能な欠陥サイズ

欠陥深さ	欠陥サイズ	サンプル数	検出振動レベル	検出可能なサイズ
3cm	φ10cm	2	3×10^{-2}	φ10cm 以上
	φ15	2	30×10^{-2}	
	φ20	2	300×10^{-2}	
	φ30	4	150×10^{-2}	
	φ50	8	50×10^{-2}	
10cm	φ10cm	2	0.8×10^{-2}	φ20cm 以上
	φ15	2	1×10^{-2}	
	φ20	2	2×10^{-2}	
	φ30	4	10×10^{-2}	
	φ50	8	10×10^{-2}	

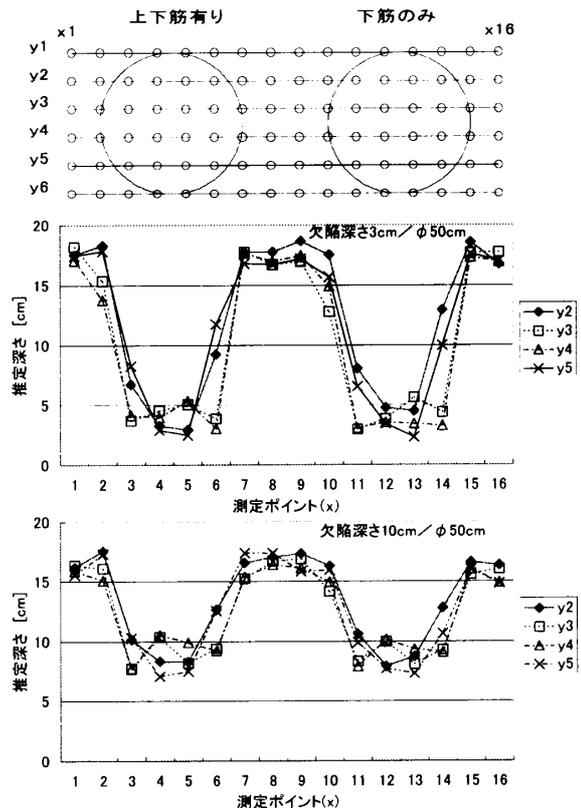
(振動レベルの閾値： 1×10^{-2})

3.4 欠陥の深さ推定及び精度

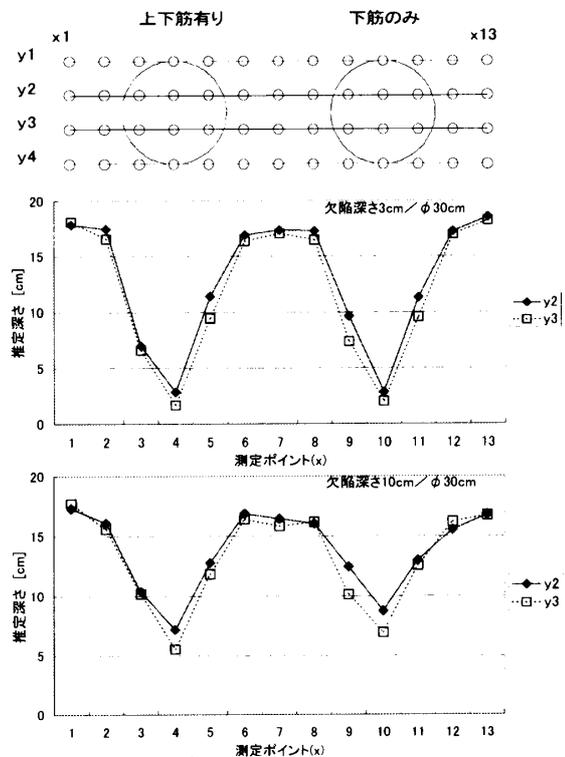
振動レベルから欠陥深さへの変換は、図-3に示す振動レベル-欠陥深さの相関曲線を使用した。

相関曲線から算出される欠陥深さを個々の人工欠陥に対し横断方向に出力した結果を図-5(a)、図-5(b)に示す。図中測線はX軸に沿っ

ており、それぞれの測線位置を Y1, Y2, ...



(a) 欠陥サイズφ50cmの推定断面



(b) 欠陥サイズφ30cmの推定断面

図-5 欠陥深さの推定断面

にて、X 軸上の位置を X1, X2, …にて表している。測線上の左側が上下筋有り、右側が下筋のみの部分に対応している。データは中央部を通る測線 y3~y6 (φ50cm), y2~y3 (φ30cm) を選択してプロットした。

① φ50cm/欠陥深さ 3cm

上筋の有無に関わらず欠陥中央部約 φ40cm の範囲で安定した深さ推定値が出力された。深さ推定値は平均 3.9cm を示した。

② φ50cm/欠陥深さ 10cm

上筋の有無に関わらず欠陥中央部約 φ40cm の範囲では約 8.7cm の深さが推定された

③ φ30cm/欠陥深さ 3cm

上筋の有無に関わらず欠陥中央部約 φ10cm~φ20cm の範囲で約 2.3cm の深さが推定された。

④ φ30cm/欠陥深さ 10cm

上筋の有無に関わらず欠陥中央部約 φ10cm~φ20cm の範囲で約 7.1cm の深さが推定された。

欠陥深さの推定精度を表-3 に示す。深さ 10cm の欠陥深さがやや浅く検出されている。

表-3 欠陥深さの計測精度

人工欠陥			欠陥深さ推定		
深さ [cm]	サイズ [cm]	サンパ ル数	推定深さ [cm]	平均 値	推定値/ 実値
3	φ50	16	2.3~5.6	3.9	1.3
	φ30	4	1.7~2.8	2.3	0.77
10	φ50	16	7.1~10.5	8.7	0.87
	φ30	4	5.6~8.8	7.1	0.71

3.5 推定深さによる欠陥マップ

欠陥の推定深さを基に作成した供試体の欠陥深さ推定マップを図-6 に示す。

図中で推定深さの出力結果に対応して青~赤への色相の変化で振動レベルの大きさを表示している。色相が赤い程欠陥位置が浅いことを示す。図より欠陥上で色相変化があり、図中には、円

形状に色相が変化している部分が数カ所に確認される。また、これらの部分は、それぞれ大きさやおのおの色相が異なっていることもわかる。これらを詳細に検討した結果、色相の変化領域の位置や大きさは、それぞれ人工欠陥の位置および直径と優れた対応を示していることがわかった。また、色相そのものによって欠陥深さのレベルも良好に推定できていることも明らかとなった。

3.6 鉄筋の影響

供試体における配筋の違い（上下筋ありと下筋のみ）において、それぞれに同じ条件で設置された欠陥を計測した結果は、

① 図-4 の異なる深さ、欠陥サイズの振動レベルにおいても、

② 図-5 の欠陥部の推定深さ、及び、図-6 の欠陥深さ推定マップにおいても、

鉄筋の有無による有意な差は認められない。

これより、欠陥の検出性能には鉄筋の影響は認められなかった。

4. まとめ

(1) 欠陥有無判定の閾値について

今回の供試体での振動レベルの閾値は、約 1×10^2 程度であった。この値より小の場合は欠陥なし、大の場合は欠陥ありと判定できる。

尚、過去の計測結果および今回の結果から閾値は、部材厚により異なることが明らかになった。

(2) 振動レベルに基づく欠陥検出

周波数応答の帯域積分式(1)で得られる振動レベルは床版構造の内部欠陥を検出するパラメータとして有効である。振動レベルにより欠陥検出が可能であることを確認した。

(3) 適用範囲

欠陥検出の適用範囲として、深さ 3cm の場合は φ10cm 以上、深さ 10cm の場合は φ20cm 以上の欠陥の検出が可能との結果が得られた。

(4) 欠陥深さの検出精度

欠陥の検出の精度は、深さ 3cm の場合は ±

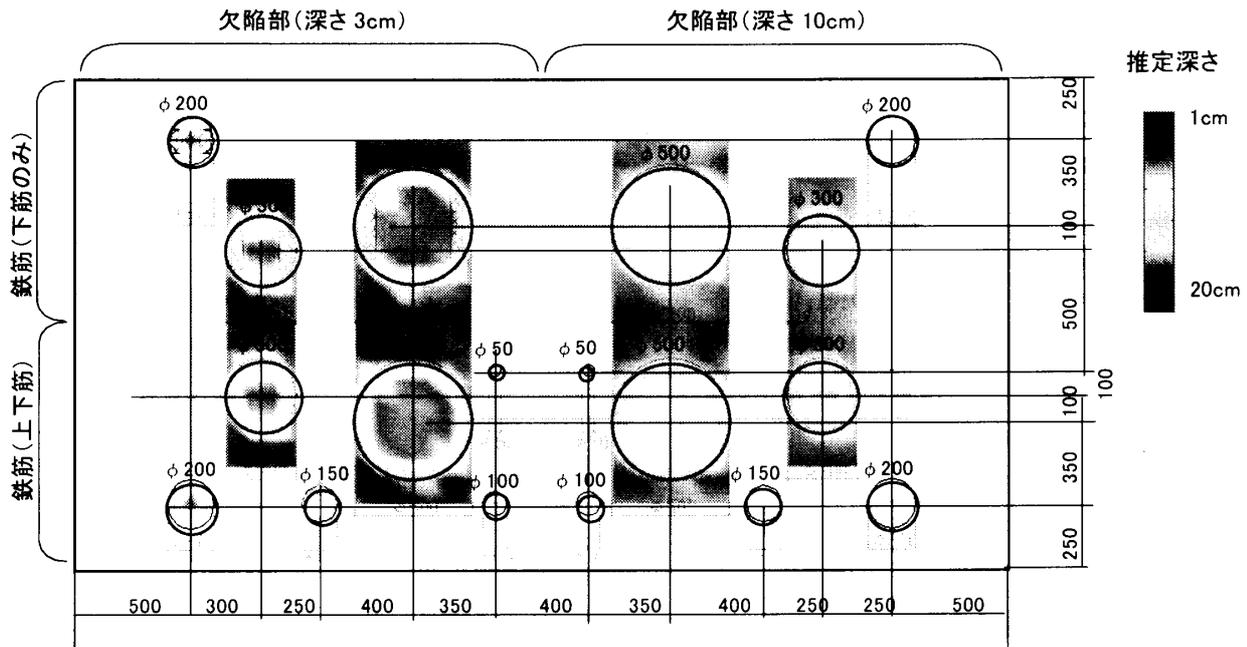


図-6 欠陥深さのマップ図

0.5cm, 深さ 10cm の場合は±2cm 程度との結果が得られた。

(5) 鉄筋の影響

上下筋, 下筋のみのデータを比較し, 鉄筋の影響は無視できることを確認した。

(6) 今後の課題

現状において鋼橋 RC 床版の補強工法の一手法として上面増厚が多く施工されており, 一部の橋梁において上面増厚床版或いは旧床版の内部コンクリートに劣化・ぜい弱や剥離などの欠陥が問題になりつつある。これに対して交通量の関係から床版下面からの診断が有効であり, 深さ 10cm 以深の欠陥検出が可能となれば今後有効な検出手段となりうる。(厚さ 20cm の現供試体においては欠陥深さ 17cm の振動レベルは 3×10^{-3} に対し, 欠陥なしで健全部の振動レベルは $2 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3}$ であり同レベル)

このため, 深さ 10cm 以深の欠陥については, 現供試体に実橋と同様な上面増厚床版, もしくは舗装を施工した供試体を製作し, 追加実験で評価する予定である。

謝辞

最後に本実験を実施するに当たり, 供試体の提供・設置等にご協力いただいた昭和コンクリー

ト工業株の関係各位に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Hattori, S., Shimada, T and Matsushashi, K.: Highly accurate low frequency elastic wave measurement using magnetostrictive devices, NDT&E international, Vol.34, pp.373-379, 2000.
- 2) 谷口修他/振動工学ハンドブック p.98-102, 養賢堂, 1976
- 3) 服部晋一, 鎌田敏郎, 竹村泰弘, 他 2 名/金属系磁歪素子による低周波弾性波を用いた RC 構造物診断装置の適用化開発/土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, 2001.10
- 4) 竹村泰弘, 鎌田敏郎, 服部晋一, 他 2 名/金属系磁歪素子による低周波弾性波を用いた RC 構造物診断装置の適用性評価/土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, 2001.10
- 5) 服部晋一, 島田隆史, 亀山俊平/低周波弾性波診断装置による実大コンクリート構造物計測評価, /日本非破壊検査協会第 9 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, pp.11-16, 2002.1