論文　低周波弾性波による増厚施工後の大型 RC 床版供試体における欠陥の非破壊評価

服部　晋一*1・鎌田　敏郎*2・島田　隆史*3・西田　久雄*4

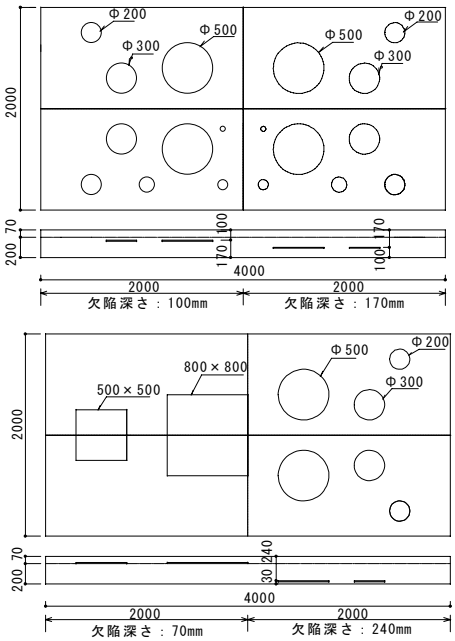
要旨：金属磁歪素子を用いた低周波弾性波によるコンクリート内部診断装置を用い，人工欠陥を内部に埋設したRC床版供試体で本装置の性能評価をすすめている。本研究では，過去の研究[2),3)]において製作した床版供試体(400×200×20cm)に7cmの増厚を施した増厚供試体での評価を行った。これにより，増厚による周波数応答の変化，検出できる欠陥サイズ，欠陥深さを明らかにした。さらに人工的に設置した新旧床版界面のはく離欠陥を床版下面から計測し，検出可能性を評価した。

キーワード：非破壊試験，低周波弾性波，金属磁歪，欠陥評価，RC 床版，増厚

1.　はじめに

低周波弾性波を使ってコンクリート構造物の内部に存在するはく離，空隙等の欠陥を診断する方法として筆者らは，RC 床版を模擬した供試体にて一連の評価を行ってきている[1)~4)]。これにより，周波数応答の帯域積分式で得られる振動レベルが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こと，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。版厚 20cm の計測では，欠陥検出の適用範囲としては，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。また文献 3)において鉄筋の影響は無視できることが判明している。一方，鋼橋 RC 床版の補強工法の一工法として最近多用されている上面増厚工法で新旧床版界面付近の内部コンクリートに劣化・ぜい弱やはく離などの欠陥が問題になりつつある。このため 10cm 以深の欠陥検出が可能となれば交通を阻害しない床版下面からの計測が可能になり，今後有効な検出手段となりうる。このため実橋と同様な上面増厚を施工した供試体を製作し実験を行い，深さ 10cm 以深の適用限界および欠陥検出の範囲を明確にしたので報告する。

写真－1　供試体外観



図－1　供試体の欠陥設置状況

2.　実験概要

2.1　供試体

写真－1 に供試体外観を示す。供試体は，構造

*1　三菱電機(株)　鉄鋼・産業エンジニアリングセンター　工修　(正会員)
*2　岐阜大学助教授　工学部社会基盤工学科　工博　(正会員)
*3　三菱電機(株)　鉄鋼・産業エンジニアリングセンター　工修
*4　(株)オーデックス　技術推進部　チーフエンジニア

全体の振動の影響を避けるため厚さ 20cm の砂層上に設置した。**図－1** に供試体に埋設された人工欠陥を示す。厚さ 20cm に対し 7cm の増厚が施されており，鉄筋付近等のはく離を想定した人工欠陥（ｔ=5mm 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，増厚表面からの深さがそれぞれ 10，17，24cm に埋設されている。また，増厚面のはく離を模擬した 50cm 角，80cm 角の人工はく離面が増厚界面に設けられている。尚，コンクリートの配合を**表－1** に示す。強度は 69.4N/mm², 動弾性係数は 41.9GPa である。

表－1 コンクリートの配合

W/C (%)	W/B (%)	単位量 (kg/m³)					
		W	C[1)]	F[2)]	S	G	Ad[3)]
50.0	33.5	175	350	173	817	841	6.8

1)普通ポルトランドセメント，2)高炉スラグ微粉末
3)減水剤

2.2 装置システムの概要

写真－2 に実験に供したシステム（一体型探査子，計測制御ユニット）を示す。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，一定圧以上にすることにより弾性波の入射，検出感度を定レベルに保って計測する。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おり，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，供試体を低周波から順次励起し，欠陥部と供試体表面が形成する薄板構造でたわみ振動を発生させる。本システムでは，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。

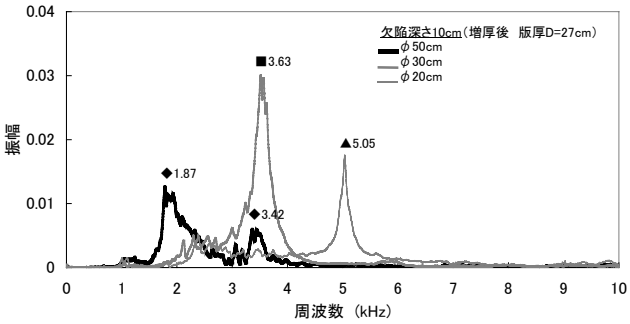
$$E = \int_{f_1}^{f_2} G(f)^2 \, df \qquad (1)$$

ここで，E は振動レベル，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。

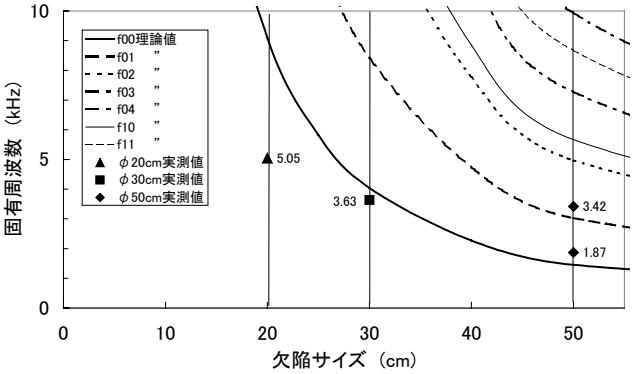
写真－2 計測状況

2.3 計測方法

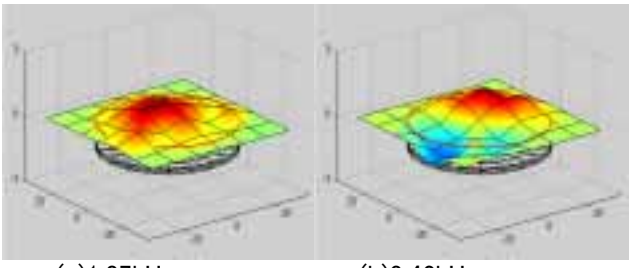
計測は，増厚面，および下面の測定位置を格子状に設定し，これを走査計測し欠陥部位の検出を行った。供試体の長軸方向を Y 軸，短軸方向を X 軸とし，測線はX軸，あるいはY軸に水平方向に一定ピッチで設定した。計測状況を**写真－2** に示す。



図－2 周波数応答（欠陥深さ 10cm）



図－3 欠陥サイズと固有周波数の関係（欠陥深さ 10cm）



(a)1.87kHz　　(b)3.42kHz

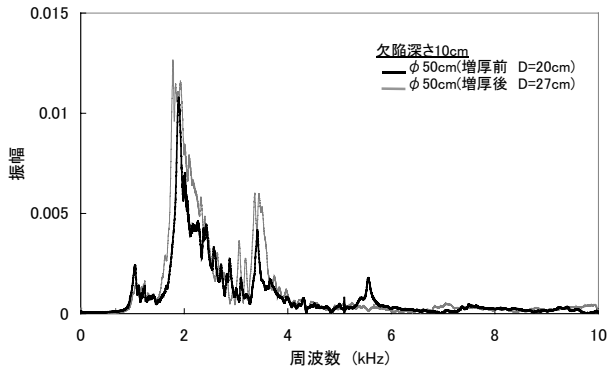
図－4 たわみ振動の可視化（欠陥深さ 10cm）

3. 実験結果

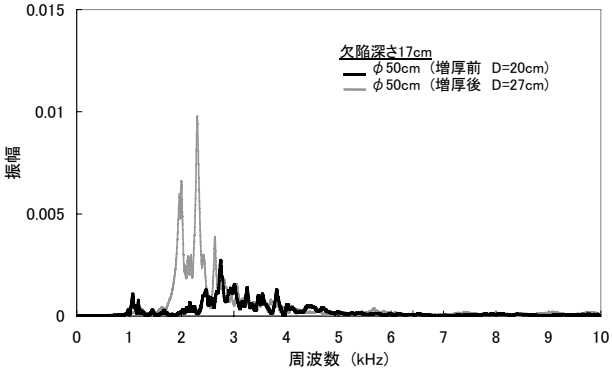
3.1 増厚後の周波数応答変化

直径が異なる欠陥の周波数応答例を**図－２**に示す。たわみ振動の固有周波数を周辺固定円板の理論式[5]より計算した結果との比較を**図－３**に示す。図中 f_{mn} は節円 m 個，節直径 n 本の振動モードの固有周波数を表す。**図－３**よりたわみ振動の周波数は，同一深さにおいては欠陥サイズが大きくなる程，固有周波数が低くなりピークの密接した応答を示す。図中のマークは実測した周波数応答より得られたピーク位置を示しており，高次の振動モードも含め理論値と近接した結果を示していることがわかる。

次に，実験により振動モードを確認するため，ピーク周波数に固定して欠陥中央を連続加振し，欠陥上の各点での応答を計測した。発振点の振幅，位相を基準とした各点の振幅，位相をデータ処理し振動モードを可視化した結果例を**図－４**に示す。このケースは直径 50cm，深さ 10cm の欠陥での振動状況を表している。**図－４(a)**は 1 次，**図－４(b)**は 2 次の振動モードに対応しており，たわみ振動の発生がビジブルに確認できた。



(a) 欠陥深さ 10cm



(b) 欠陥深さ 17cm

図－５　増厚前後の周波数応答

増厚前に測定した周波数応答と増厚後の周波数応答の比較例を**図－５**に示す。増厚前後での周波数応答を比較すると，欠陥深さ 10cm の場合は増厚前後で良好な一致を示した。

一方，欠陥深さ 17cm の場合は，増厚後の応答の方が振幅が大きく振動応答に変化が見られた。

3.2 欠陥深さと振動レベルの関係

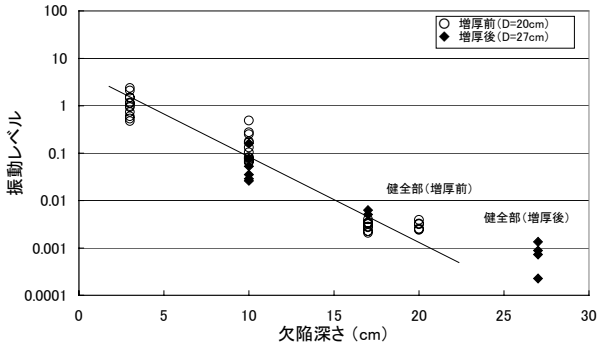
増厚供試体の人工欠陥上で計測された振動レベルについて欠陥の深さをパラメータとした結果を**表－２**に示す。

表－２　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	振動レベル 標準偏差σ
3(増厚前)	12	1.1	0.71
10(増厚前)	12	1.9×10^{-1}	1.6×10^{-1}
10(増厚後)	5	9.5×10^{-2}	－
17(増厚前)	12	3.1×10^{-3}	6.7×10^{-4}
17(増厚後)	2	5.7×10^{-3}	－
27(版厚)	4	8.0×10^{-4}	－

計測ポイントは，欠陥サイズφ30cm では中央の 2 点，φ50cm では中央の 4 点をサンプリングしている。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－６**に示す。欠陥が無い部位での振動レベルは，増厚前の 2×10^{-3}～4×10^{-3} に対し，約 1/5 倍の 2×10^{-4}～1×10^{-3} に低減した。これは版厚の増加により床版の曲げ剛性が増大したためと思われる。

振動レベルは，**図－６**に示すように欠陥深さ



図－６　欠陥深さと振動レベルの関係

と良好な相関を有している。深さ 10cm においては増厚後で振動レベルが若干低減した。一方，深さ 17cm では振動レベルの若干の増大が見られる。さらに健全部（増厚前は 20cm，増厚後は 27cm）は版厚の変化より振動レベルが低下していることがわかる。この結果，増厚前には健全部と識別が難しかった深さ 17cm の欠陥が，健全部（厚さ 27cm）の振動レベルが低下したことにより，識別可能となっていることがわかる。尚，図中の振動レベルと欠陥深さの相関近似曲線は，増厚前に算出した $y=4.56\times e^{-0.412x}$ である。ここで，x は振動レベル，y は欠陥深さ[cm]である。

3.3　欠陥サイズと振動レベルの関係

増厚後の欠陥サイズと振動レベルの相関を欠陥深さをパラメータとして**図－７**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リングした。各深さとも欠陥サイズがある大きさより大きくなると，振動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。

増厚後に計測された深さ 17cm の振動レベルにおいても，深さ 3cm，10cm の結果と同様な特性を示すことが確認された。増厚前の計測結果において，10cm 深さで欠陥サイズが 30cm のときに振動レベルが最も大きくなる現象は，増厚後の計測結果にも現れた。同様な現象は，深さ 3cm の欠陥に対し，欠陥サイズ 20cm の場合にも現れている。

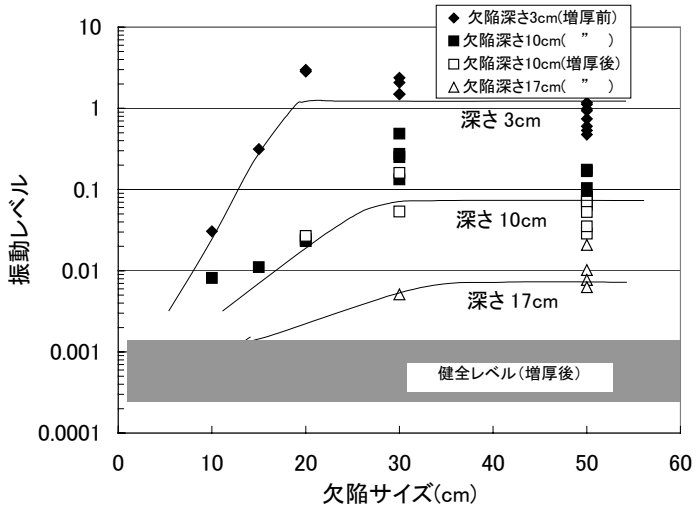
図－７中の相関曲線は，振動レベルが徐々に増加する領域においては指数近似で，また振動レベルがほぼ頭打ちとなる範囲においては，その平均値（一定値）にて表している。

3.4　欠陥検出の閾値

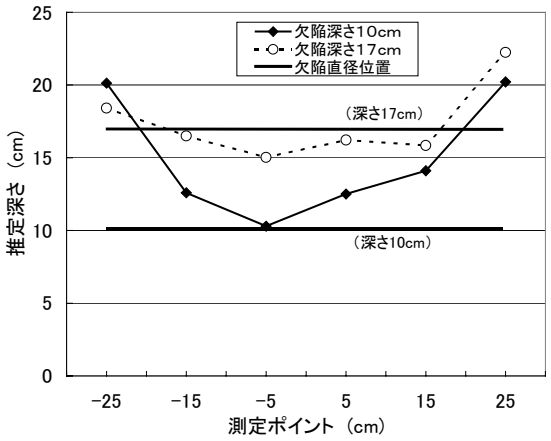
増厚供試体の欠陥の無い箇所での振動レベル（以降　健全レベルとする）は 2×10^{-4}～1×10^{-3} のため，欠陥を検出できる振動レベルの閾値は，健全レベルの上限の 2 倍強の 2×10^{-3} とした。即ち，増厚前と比較し約 1/5 となった。欠陥深さと振動レベルの相関（**表－２**，**図－６**）より欠陥深さ 3cm，10cm，17cm の振動レベルは，健全レベルに対し 1 桁以上のレベル差があり，有意に欠陥の検出が可能である。

3.5　欠陥深さの推定精度

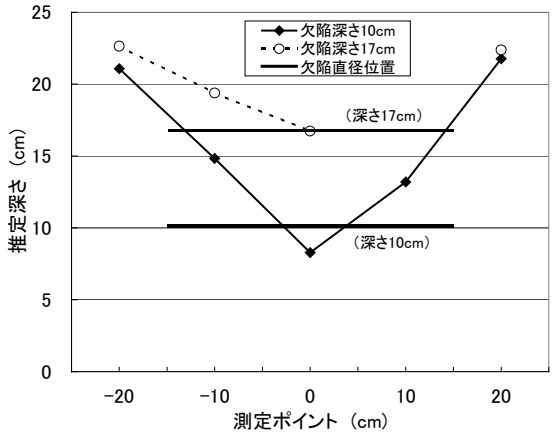
振動レベルから欠陥深さの推定は，**図－６**に



図－７　欠陥サイズと振動レベルの関係



(a) 欠陥サイズφ50cm の推定断面



(b) 欠陥サイズφ30cm の推定断面

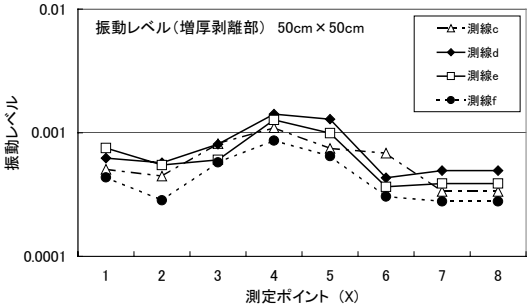
図－８　欠陥深さの推定断面

示す振動レベル－欠陥深さの相関曲線を使用した。個々の人工欠陥について，それぞれの欠陥の中心点を通る側線上で 10cm ピッチで計測した結果に対して相関曲線を用いて推定深さを求め，それらを横断方向に出力した結果を**図－8**に示す。この図においては，横軸（測定ポイント）における 0cm が，欠陥の中心点に相当している。また，人工欠陥の直径の大きさがわかるように，太線でその領域を示した。

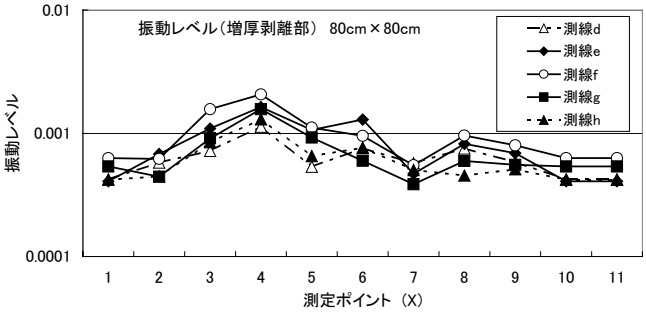
欠陥が深くなるにつれ，また欠陥の直径が小さくなるにつれ欠陥周辺部の振動レベルが低下し，深さ推定値の誤差が大きくなる。増厚後の異なる欠陥深さにおける各欠陥サイズの推定精度を**表－3** に示す。

表—3　欠陥深さの推定精度（増厚後）

人工欠陥		欠陥深さ推定		
深さ [cm]	サイズ [cm]	計測値 [cm]	平均値 [cm]	計測値／実寸値
10	φ50	10.3～14.1	12.4	1.24
	φ30	8.3～14.8	7.3	0.73
17	Φ50	15.0～16.5	15.9	0.94
	Φ30	16.7～19.4	18.1	1.10



(a) はく離部 (50cm 角) の断面



(b) はく離部 (80cm 角) の断面

図－９　振動レベル（新旧床版界面）

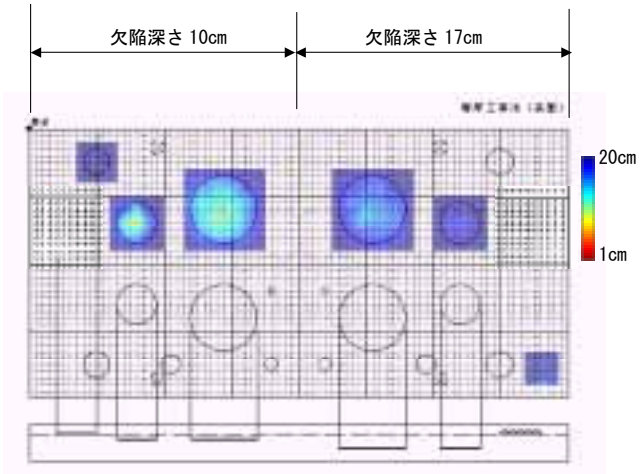
3.6　新旧床版界面はく離部の検出

増厚供試体の新旧床版界面に設置したはく離部を計測した結果を**図—９**に示す。この**図**は下面からはく離部を計測した結果の横断図であり，表面からの深さが 20cm と深くなっているため振動レベルはかなり低い。このため，上記の欠陥判定閾値と比較し健全部との差が小さい結果となっている。ただし，新旧界面のはく離については欠陥の発生（下面からの深さが 20cm）が特定できること。また欠陥の発生状況が表面と平行な平面状況と推定されることより，判定基準を健全部の振動レベルのばらつきより高いレベル約 1×10^{-3} に設定することにより振動レベルの差を強調し，有意差を得る方法が適用可能である。図中欠陥中央は縁部に対し大きな振動レベルを有していることから，閾値以上の振動レベルを検出した場合，はく離ありと判断することが可能である。

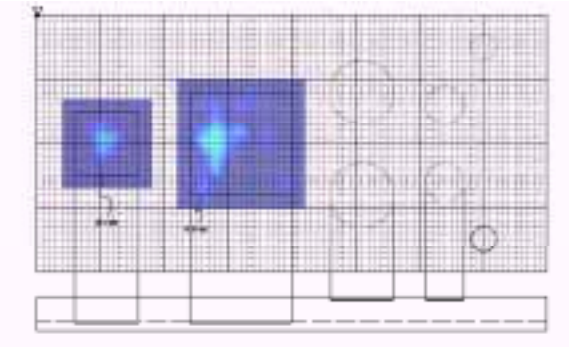
3.7　欠陥深さ推定マップ

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－１０**に示す。図中，推定深さの出力結果に対応して色相の変化で振動レベルの大きさを表示している。図では明度が高い部分が欠陥深さが浅いことを示しており，増厚後深さ 17cm の欠陥上も明度変化があり，検出できることが確認できた。

また**図－１１**に示す増厚はく離部の欠陥推定マップは下面からの欠陥推定マップである。本



図－１０　欠陥深さ推定マップ（増厚後供試体）



図－１１　欠陥推定マップ（増厚はく離部）

図においても，明度が高い部位が振動レベルが高いことを示しているが，増厚はく離部の一部が明度変化していることが確認でき，床版下面から増厚はく離が検出しうることがわかる。

4.　まとめ

(1)　欠陥有無判定の閾値について

増厚前の供試体(版厚 20cm)での欠陥検出の閾値が約 1×10^{-2} に対し，増厚後（版厚 27cm）の閾値は，約 2×10^{-3} 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。増厚により深さ 17cm の欠陥応答が有意に検出でき，検出可能であることを確認した。

(2)　欠陥検出可能範囲

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，深さ 17cm の場合はφ30cm 以上の欠陥の検出が可能との結果が得られた。

(3)　新旧床版界面はく離部の検出

新旧床版界面のはく離を模擬した箇所を計測し，振動レベルの変化から増厚はく離部が検出できる可能性を確認した。

5.　今後の課題

- 低周波弾性波を用いた内部欠陥の検出については，欠陥サイズと振動レベルの相関曲線より得た推定式を活用して，汎用性の高い欠陥評価システムを構築する。
- また鋼橋 RC 床版の補強工法の一工法として多用されている上面増厚での新旧界面の床版下面からのはく離検出が可能であることが確認されたため，今後モデル検証の結果の解析を継続し，実床版への適用拡大を検討していく。

謝辞

最後に本実験を実施するに当り，終始助言等を得た岐阜大学工学部社会基盤工学科 浅野雅則院生と供試体の提供・設置等にご協力いただいた昭和コンクリート工業㈱の児玉一郎氏始め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 Matsuhashi, K.: Highly accurate low frequency elastic wave measurement using magnetostrictive devices, NDT&E international, Vol.34, pp.373-379, 2000.

2) 服部晋一，鎌田敏郎，竹村泰弘，井上正光，島田隆史：低周波弾性波非破壊検査装置によるRC床版の内部欠陥に対する検出性能の評価，土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集，pp. 369-370，2002.9

3) 服部晋一，鎌田敏郎，竹村泰弘，西田久雄：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.24,No.1，pp.1533-1538，2002.6

4) 服部晋一，島田隆史，亀山俊平，松橋貫次：低周波探触子とその応用―金属磁歪素子を用いた低周波弾性波法によるコンクリート構造物診断―，非破壊検査，第 52 巻 1 号，pp.14-19，2003.1

5) 谷口修他：振動工学ハンドブック，pp.98-102，養賢堂，1976