

論文 衝撃弾性波を用いた接着工法における接合面の剥離判定方法への一考察

岩野 聡史^{*1}・内田 明^{*2}・多田 大史^{*3}・岡田 慎哉^{*4}

要旨：コンクリート構造物の補修・補強工法として開発・適用されている接着工法では、既設コンクリート面に補強材を接着させることで性能が発揮される。これから、接合面での一体性の確保は施工管理において重要となる。さらに、この接合面は経年劣化で剥離する懸念もあり、維持管理での点検項目としても重要となる。現時点では、これらの試験は人の耳で変状の有無を判断する打音検査で実施されているが、客観的な判断などに課題がある。著者らは、これらの課題を解決する試験方法として衝撃弾性波法に着目し、室内試験と現地調査によりその判定性能を評価し、剥離の判定に適用可能であることを検証した。

キーワード：維持管理, 接着工法, 施工管理, 非破壊試験, 衝撃弾性波法, 振幅加算値

1. はじめに

コンクリート構造物の維持管理の一手段として、様々な工法による補修・補強が実施されている。補修・補強は部材、構造物の力学的な性能を回復もしくは向上させることを目的としており、構造物の長寿命化に寄与する対策である。しかしながら、実際の補修・補強の施工が、施工不良などにより計画・設計通りに実施されていなければ、補修・補強後の再劣化の要因などとなり、前述の目的を満足できない危険性が考えられる。これから、補修・補強の施工管理を、構造物を壊さずに直接試験する非破壊試験により実施することは、コンクリート構造物の維持管理において有効な手段になると考えられる。

これらを背景として、本研究では、断面修復工法、増厚工法およびコンクリート巻立工法など、母材コンクリートに厚さ数十 mm の補修・補強材料を接着させる接着工法を対象として、母材コンクリートと補修・補強材料との剥離状況を衝撃弾性波法により試験する方法を検討した。研究では、補修・補強材料は厚さ 20mm~100mm 程度のポリマーセメントモルタル（以下、PCM という）を想定した。まず、供試体実験により、母材コンクリートと PCM との剥離状況によって衝撃弾性波法の測定値がどのように変化するかを確認し、試験方法や適用条件について検討した。さらに、下面増厚工法による補強後 15 年が経過した実橋梁で測定し、供試体実験により検討した母材コンクリートと PCM との剥離状況の試験方法を検証した。本書では、これらの実験結果について報告する。

2. 測定原理および実験概要

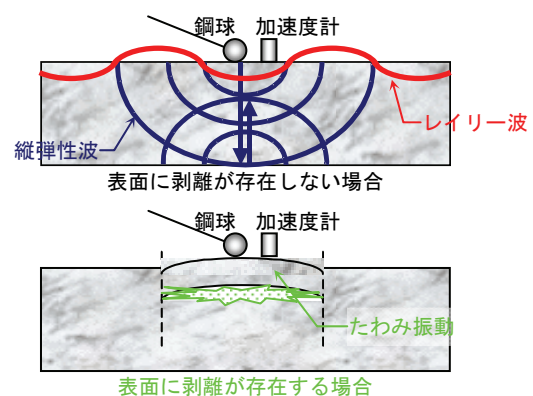


図-1 発生する振動の模式図

本研究では、厚さ数十 mm の PCM と母材コンクリートとの剥離状況を試験する方法を検討している。測定方法は PCM の表面に加速度計を設置し、近傍の鋼球打撃により発生する振動を測定する方法である。始めに、コンクリート表面付近での剥離等の空隙の存在が、鋼球打撃により発生する振動へ及ぼす影響を模式図（図-1）に示す¹⁾。表面付近に剥離が存在しない場合には、コンクリート内部を球面状に伝搬して、コンクリート表面と背面等の反射面で反射を繰り返す縦弾性波や、コンクリート表面を上下方向に楕円を描くように伝搬するレイリー波などが発生する。これに対して、表面付近に剥離が存在し、剥離までの深さに対して鋼球打撃による入力波長が長くなる場合には、剥離部分のたわみによる振動（以下、たわみ振動という）が発生する。

*1 リック(株) 技術研究所 (正会員)

*2 前田工繊(株) 環境資材事業本部 博士(工学) (正会員)

*3 前田工繊(株) 札幌支店 (非会員)

*4 (独)土木研究所寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ 博士(工学) (正会員)

コンクリート表面と反射面で反射を繰り返す縦弾性波により生成される周波数は、式(1)に示す周波数 f_0 となる。また、剥離部の断面形状を円形とすれば、たわみ振動により生成される周波数は、式(2)に示す周波数 f_{mn} となる²⁾。

$$f_0 = \frac{V_p}{2D} = \frac{1}{2D} \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

$$f_{mn} = \frac{h}{2\pi \cdot a^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\nu^2)}} \cdot R_{mn} \quad (2)$$

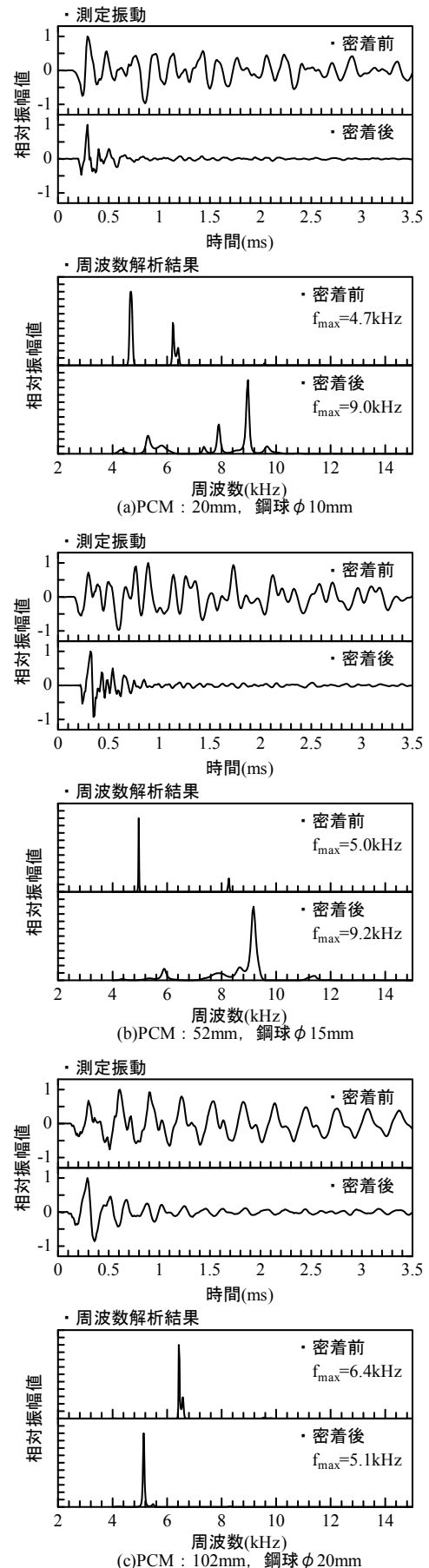
ここで、 V_p は縦弾性波速度、 D は縦弾性波の反射面までの深さ、 E は弾性係数、 ρ は密度、 ν はポアソン比、 h は剥離部分までの深さ、 a は剥離部の半径、 R_{mn} はたわみ振動を形成する固有値である。以上のとおり、コンクリート表面付近に剥離等の空隙が存在するか否かによって、測定される振動の種類や周波数は変化することとなる。これから、これらの変化に着目すれば、PCMと母材コンクリートとの剥離状況を試験できるものと考えられる。そこで、今回の実験では、先ず、供試体として厚さの異なるPCM板を製作し、コンクリート供試体と密着した場合と密着していない場合に測定される振動を比較し、衝撃弾性波法による試験方法や適用条件について検討した。さらに、下面増厚工法による補強後15年が経過した実橋梁で測定し、供試体実験により検討した母材コンクリートとPCMとの剥離状況の試験方法を検証した。

使用したPCMは、ポリアクリル酸エステル共重合樹脂系特殊ポリマーセメントモルタルで、ポリマー/セメント比=12%、W/C=32%、標準養生における材齢28日時の圧縮強度の規格値は30.0N/mm²である。衝撃弾性波法で測定に使用した加速度計は圧電型加速度計（感度10mV/(m/s²）、周波数範囲0.3Hz～12kHz）で、サンプリング間隔は10 μ sである。測定振動に対する周波数解析方法は最大エントロピー法とした。

3. 供試体による実験結果

3.1 実験概要

長さ・幅が300mm×300mmで厚さが20mm、52mm、102mmと異なるPCM板を供試体に用いた。PCM板の中央位置を測定点として、直径10mm、15mm、20mmの鋼球打撃により発生する振動を測定した。この測定をPCM板がコンクリート供試体に密着していない状態と、超速硬性無機化合物を主成分とする止水材により密着している状態で実施した。コンクリート供試体は、形状が870mm×900mm×厚さ300mm、W/C=48.0%、材齢28日時の圧縮強度は36.2N/mm²である。また、止水材は硬化時間15分～35分タイプを使用し、PCM板をコンクリート供試体に接着させてから2時間後に測定した。



図－2 供試体での測定波形と周波数解析結果

3.2 測定結果および考察

(1) 周波数解析による検討

各条件での測定振動と周波数解析結果の一例を図-2に、全周波数解析結果において、振幅が最大となった周波数 $f_{\max}$ を図-3 に示す。密着前の測定結果に着目すると、周波数 $f_{\max}$ は鋼球直径に関係なく、厚さ 20mm の PCM 板では 4.7kHz、52mm では 5.0kHz、102mm では 6.4kHz となった。密着前の周波数 $f_{\max}$ は PCM 板の厚さが厚くなると高くなっている。これは、式(2)に示したたわみ振動による周波数は剥離部分までの深さ、つまり、PCM 板の厚さによって変化することと一致した結果である。これから、密着前の PCM 板では、厚さ 20mm、52mm、102mm とともに、鋼球直径 10mm、15mm、20mm に関係なく、たわみ振動が測定されたものと考えられる。

次に、密着後の周波数 $f_{\max}$ は鋼球直径に関係なく、厚さ 20mm、52mm、102mm とともに密着前と変化していることが分かる。これから、密着後にはたわみ振動以外の振動が測定されたものと考えられる。ただし、測定された周波数 $f_{\max}$ は鋼球直径によって変化し、常に式(1)に示される多重反射による周波数が測定されているとは限らない。具体的には、PCM 板とコンクリート供試体の両者での多重反射による周波数は、縦弾性波速度を 4000m/s とすれば、式(1)により、厚さ 20mm (合計厚さ 320mm) の PCM 板では 6.3kHz、52mm では 5.7kHz、102mm では 5.0kHz となるが、この周波数が測定されたのは、厚さ 52mm と 102mm の PCM 板を鋼球直径 20mm で測定した場合のみである。また、測定される周波数 $f_{\max}$ が密着の前後でどのように変化するかを見ると、厚さ 102mm、鋼球直径 20mm だけが密着後の周波数が低くなった。密着による周波数 $f_{\max}$ の変化内容は PCM 板の厚さや測定する鋼球直径などの条件によって異なることが分かる。

これらの原因は、図-1 に示したとおり、鋼球打撃による測定ではレイリー波など複数の振動が発生することから、測定される周波数 $f_{\max}$ は測定する鋼球の直径によって変化することによる。つまり、測定する鋼球の直径によって、入力される振動の周波数帯域は変化するが、測定される周波数 $f_{\max}$ は、この入力される振動の周波数帯域と近似する振動の周波数となることによる³⁾。

以上の結果より、PCM と母材コンクリートとが密着している場合に測定される周波数 $f_{\max}$ を予測することは困難である。また、剥離が存在する場合に測定されるたわみ振動の周波数は、剥離までの深さや剥離の断面寸法によって変化する。これから、剥離の形状や位置、測定する鋼球の直径などの条件によっては、密着している場合に測定される周波数とたわみ振動による周波数とが一致する場合も考えられる。つまり、人の耳で変状の有無を判断する打音検査では、発生する振動の周波数の変

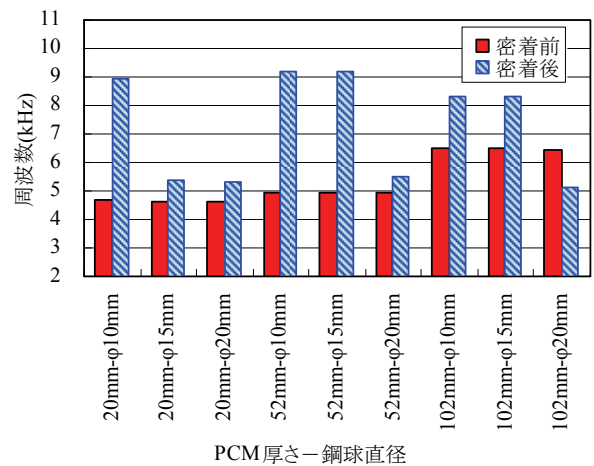


図-3 各条件で振幅が最大となった周波数の比較

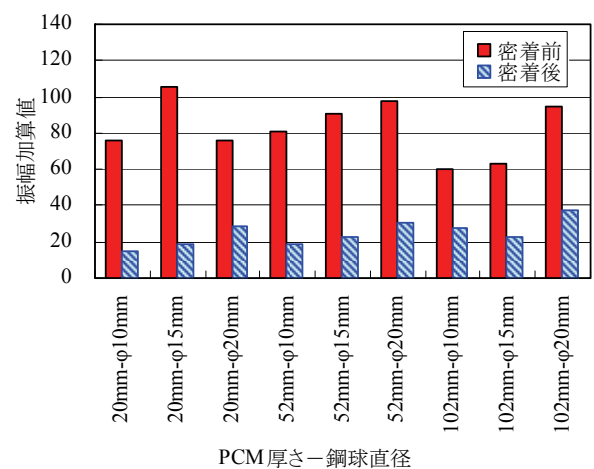


図-4 各条件での振幅加算値の比較



写真-1 下面増厚状況 (A橋)



写真-2 剥離状況の測定状況 (B橋)

化に着目した判定がされていると考えられるが、このような周波数のみによる比較では PCM と母材コンクリートとの剥離状況の判定を誤る場合があると考えられる。

(2) 測定振動の振幅値に着目した検討

図-2 に示した測定振動の時間経過による減衰に着目すると、密着前後で差があることが確認される。これは、たわみ振動は他の振動と比較して、振動の伝搬範囲が狭くエネルギー損失が小さくなることによるものと考えられる。そこで、各測定条件での振幅加算値 Y_s を式(3)により算出して比較した。

$$Y_s = \sum_{t=0}^{3.5ms} |y(t)| \quad (3)$$

ここで、 $y(t)$ は時間 t での測定波形の振幅値である。また、打撃強さによる影響を除去するため、測定時間内での最大値により標準化した相対振幅値である。各条件での振幅加算値の比較を図-4 に示す。厚さ 20mm, 52mm, 102mm とともに、鋼球直径 10mm, 15mm, 20mm に関係なく、PCM 板とコンクリート供試体とが密着することにより、たわみ振動は観察されず、振幅加算値が著しく小さくなることが分かる。

(1)より、周波数解析による比較では PCM と母材コンクリートとの剥離状況の判定結果を誤る場合が考えられた。これに対して、振幅加算値は PCM 板の厚さや鋼球直径に関係なく、密着により著しく小さくなる変化を示した。これから、振幅加算値は剥離状況の評価に有効な測定値になると考えられる。

4. 実構造物における実験結果

4.1 実験概要

3章の実験結果より、PCM と母材コンクリートとが剥離していれば、たわみ振動が発生し、周波数解析結果で振幅が最大となる周波数 f_{max} や振幅加算値 Y_s が変化することが確認された。これらを実構造物で検証するため、昭和40年代に建設され平成7年に下面増厚工法にて補強が行なわれた道路橋2橋（名称をA橋、B橋とする）で実験を行った。構造物の状況と測定状況を写真-1、写真-2 に示す。

A 橋、B 橋ともに供試体実験と同じ材料の PCM により約 20mm の厚さで増厚している。床版部の母材コンクリートは厚さが 150mm 程度であり、使用コンクリートの配合等は不詳である。母材コンクリートの側面で衝撃弾性波法の伝搬時間差法⁴⁾により縦弾性波速度を測定すると、A 橋で 3887m/s、B 橋で 3888m/s であった。縦弾性波速度の測定状況を写真-3 に示す。

測定点は橋軸方向と横断方向に格子状に 50mm 間隔で設定し、A 橋では 5 点×10 点、B 橋では 7 点×9 点で測



写真-3 縦弾性波速度の測定状況 (A橋)

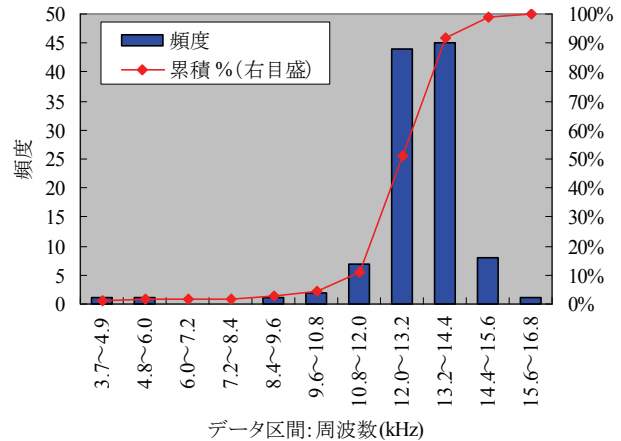


図-5 2橋の全113点での周波数 f_{max} のヒストグラム

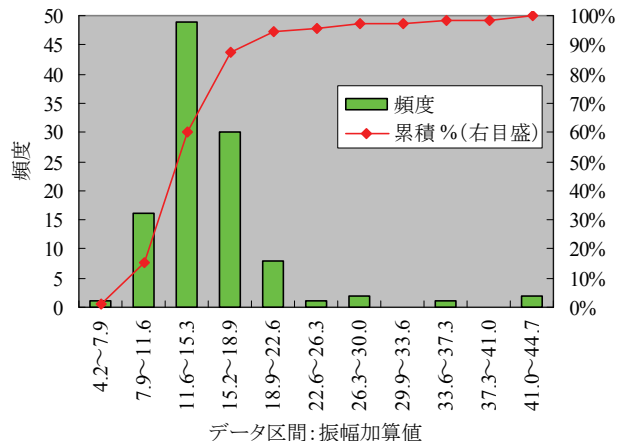


図-6 2橋の全113点での振幅加算値のヒストグラム

表-1 周波数 f_{max} と振幅加算値の統計処理結果

	振幅が最大となる周波数 (kHz)	振幅加算値
平均値 : m	13.1	15.5
標準偏差 : σ	1.5	5.5

定した。測定に使用した鋼球の直径は 10mm である。

4.2 測定結果

(1) 判定方法の検討

3章の実験結果では、周波数解析結果で振幅が最大となる周波数 f_{max} や振幅加算値 Y_s が変化することが確認されたが、定量的な判定基準値を設定することはできていない。そこで、今回の実験では、A 橋、B 橋の部材厚さ、使用した PCM、PCM の厚さ、そして、縦弾性波速度に大きな差が無いことから、2 橋の全 113 点での測定値の統計処理により判定基準を設定した。全測定値のヒスト

グラムと平均値、標準偏差の算出結果を図-5、図-6、表-1に示す。

3章の実験結果より、周波数 $f_{\max}$ は密着している場合には剥離部のたわみ振動の周波数よりも高くなることも低くなることも考えられる。また、振幅加算値は密着している場合には、剥離が存在する場合よりも小さくなることが確認されている。これらと平均値、標準偏差の算出結果より、平均値から 3σ 離れたデータが異常値であると考え、周波数 $f_{\max}$ は8.5kHz~17.6kHzの範囲外、振幅加算値は32.0以上であれば異常値とする判定基準値を設定した。

(2) 測定結果

A橋の全測定点での周波数 $f_{\max}$ の測定結果および判定結果を図-7、表-2に、振幅加算値の測定結果および判定結果を図-8、表-3に示す。また、B橋の全測定点での周波数 $f_{\max}$ の測定結果を図-9に、振幅加算値の測定結果を図-10に示す。

測定結果より、B橋は周波数 $f_{\max}$ 、振幅加算値ともに異常値となる測定点は存在しなかった。PCMと母材コンクリートとの剥離は存在していないものと考えられる。一方、A橋は周波数 $f_{\max}$ では2測定点、振幅加算値では3測定点で異常値と判定された。橋軸方向750mm、横断方向200mmの測定点では、周波数 $f_{\max}$ が正常値、振幅加算値が異常値となり、両者による判定結果が一致しない結果となった。

判定結果が一致しない原因としては、剥離によるたわみ振動の周波数は、式(2)に示したとおり、剥離が発生している深さ位置や剥離の断面寸法によって変化することから、判定基準内の周波数と一致したことにより、周波数 $f_{\max}$ による判定では異常値と判断できなかったことが考えられる。

ここで、式(1)と式(2)から、多重反射による周波数 f_0 とたわみ振動による周波数 $f_{\min}$ とが一致する条件は式(4)の条件となる。ポアソン比 ν を0.2、 $R_{\min}=1$ となる一次たわみ振動を想定すれば、式(4)から式(5)が得られる。

$$a^2 = \sqrt{\frac{(1-2\nu)}{3\pi^2(1-\nu)^2}} \cdot h \cdot D \cdot R_{\min}^2 \quad (4)$$

$$a = 0.422 \cdot \sqrt{h \cdot D} \quad (5)$$

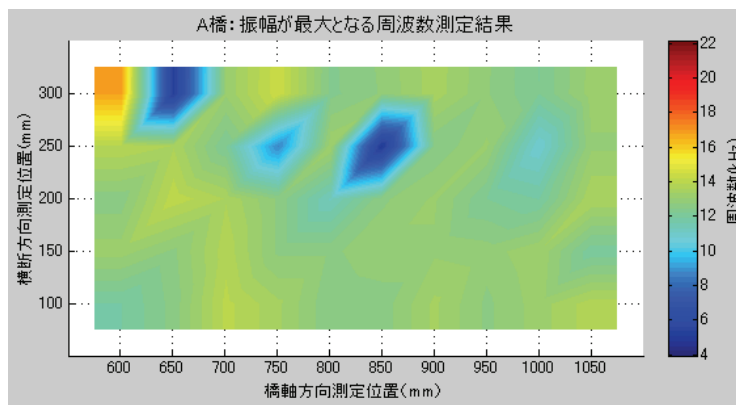


図-7 全測定点での周波数 $f_{\max}$ の測定結果 (A橋)

表-2 周波数 $f_{\max}$ の測定結果および判定結果 (A橋, ■: 異常値)

構造物名称 A橋		橋軸方向測定位置(mm)									
		600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050
横断方向測定位置 (mm)	300	16.8	5.2	13.1	14.4	12.4	12.8	13.5	12.8	12.2	13.2
	250	13.9	13.6	12.2	8.7	13.3	4.9	12.5	13.1	10.8	13.0
	200	12.6	14.1	13.6	12.7	11.3	12.7	13.1	12.2	11.9	13.6
	150	13.2	12.7	13.8	12.7	12.7	13.0	13.0	12.9	13.3	12.0
	100	11.9	12.6	14.0	13.4	12.5	12.6	13.4	12.7	13.2	13.8

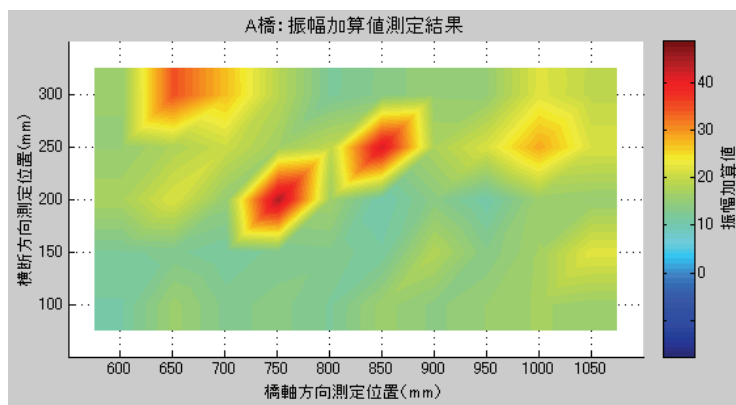


図-8 全測定点での振幅加算値の測定結果 (A橋)

表-3 振幅加算値の測定結果および判定結果 (A橋, ■: 異常値)

構造物名称 A橋		橋軸方向測定位置(mm)									
		600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050
横断方向測定位置 (mm)	300	15.5	34.7	27.1	18.7	12.0	13.7	15.3	15.2	22.2	19.2
	250	15.4	17.8	20.4	16.5	19.4	41.7	17.6	21.5	28.7	21.6
	200	17.3	21.7	15.2	44.7	16.3	10.2	13.9	10.5	16.0	15.4
	150	12.1	12.7	11.3	12.8	13.1	11.5	18.2	13.6	16.6	22.3
	100	11.2	15.9	13.0	13.8	12.2	16.0	14.1	15.5	16.7	15.9

A橋はPCMの厚さが20mmであり剥離部分までの深さ h は20mmに設定できる。また、多重反射による反射面までの深さ D は床版部の厚さから150mm程度である。式(5)にこれらを代入すれば、剥離部の半径 a が23mmであれば多重反射による周波数とたわみ振動による周波数

とが一致する。さらに、判定基準値は平均値から $\pm 3\sigma$ の周波数を正常値とすることから、たわみ振動が発生しながら異常値と判定されない条件は、剥離部の半径が23mmの条件よりも広い条件になる。

以上の結果より、PCMと母材コンクリートとの剥離の有無は、周波数 $f_{\max}$ では正確な判定ができない場合があり、振幅加算値により判定することが妥当であると考えられる。

5. まとめ

接着工法でのPCMと母材コンクリートとの剥離状況を、非破壊試験である衝撃弾性波法により確認する方法について検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1)厚さ20mm, 52mm, 102mmのPCM板をコンクリート供試体と密着していない状態で測定すると、直径10mm, 15mm, 20mmの鋼球打撃により、たわみ振動が発生することが確認された。
- (2)たわみ振動の周波数は、剥離の発生位置や断面寸法で変化する。また、PCMと母材コンクリートとが密着している場合に測定される周波数は、打撃する鋼球の直径などの条件で変化する。これらから、PCMと母材コンクリートとが密着している場合に測定される周波数と、密着していない場合でのたわみ振動による周波数が一致することも考えられる。
- (3)たわみ振動は時間経過による振幅の減衰が小さい。これから、振幅加算値は、PCM板の厚さや打撃する鋼球の直径に関係なく、PCM板とコンクリート供試体との密着によって著しく小さくなる変化を示す。
- (4) (2)・(3)より、周波数のみによる比較ではPCMと母材コンクリートとの剥離状況の判定を誤る場合がある。これに対して、振幅加算値は判定に有効な測定値になると考えられる。実際に、下面増厚工法による補強後15年が経過した実構造物で測定すると、周波数による比較では、(2)に示した原因により正確な判定ができない場合があることが確認された。振幅加算値により判定することが妥当である。

以上のとおり、測定振動の振幅加算値を利用することで、厚さ20mm～100mm程度のPCMと母材コンクリートとの剥離状況を客観的に評価できることが確認された。また、本法では、測定値を装置に記録できることから、測定結果を視覚的に捉えることや、経年変化の確認などが可能となる。本法は、コンクリート構造物の維持管理において有効な試験方法となるものと期待される。

謝辞

本実験の実施にあたり、日本大学生産工学部 渡部正准

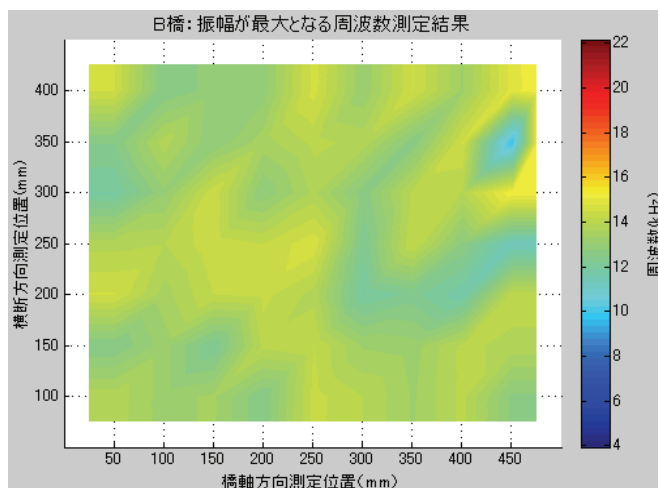


図-9 全測定点での周波数 $f_{\max}$ の測定結果 (B橋)

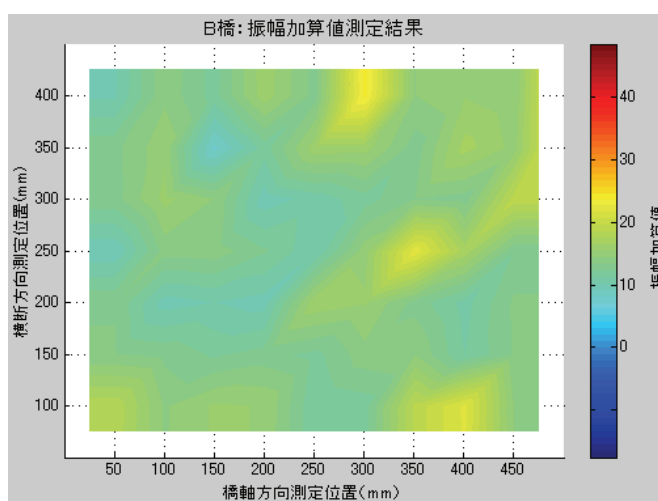


図-10 全測定点での振幅加算値の測定結果 (B橋)

教授よりご指導を賜りました。また、供試体実験では株式会社八洋コンサルタント 高橋幸様に多大なるご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会:コンクリート構造物の非破壊評価技術の信頼性向上に関する研究小委員会 (JSCE339 委員会) 成果報告書, コンクリート技術シリーズ No.88, pp.78, 2009.12
- 2) NDIS 2426-2:コンクリート構造物の弾性波による試験方法—第2部:衝撃弾性波法, pp.37, 2009.12
- 3) 岩野聡史, 森濱和正:コンクリート部材を打撃して得られた振動波形の周波数解析方法に関する検討, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.67, No.2, pp.297-308, 2011.
- 4) 独立行政法人土木研究所, 社団法人日本非破壊検査協会:非破壊・微破壊試験によるコンクリート構造物の検査・点検マニュアル, pp.137-140, 大成出版社, 2010.8