

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月23日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760435

研究課題名（和文） 打音・表面振動・弾性波の相関性に着目した鋼板巻立て橋脚の点検診断技術の確立

研究課題名（英文） Establishment of a diagnostic technique for concrete pier with steel-plate jacket based on hammering sound, surface vibration and elastic wave

研究代表者

玉井 宏樹（TAMAI HIROKI）

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：20509632

研究成果の概要（和文）：

鋼板巻立て補強橋脚の点検診断技術の確立に向けて、打撃音や打撃面表面の加速度を特徴量とすることにより異種材料で構成されたコンクリート部材の健全度診断の可能性を検討した。研究機関を通して、大別して、理想的環境下における供試体実験による検討と解析による検討を実施した。その結果、打撃音と表面加速度の相関性は強いことと、接着鋼板の厚さに依存するが、鋼板とコンクリートの付着部の欠陥に関しては、打撃音や加速度データによる健全度の定量的評価が可能であることが確認できたと同時に、その適用限界を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

The object of this study is to establish a diagnostic technique and system for concrete pier with steel-plate jacket. To achieve this object, we focused on hammering sound, surface vibration, elastic wave and their correlation. As the result, we made clear their correlation and the applicability of hammering test through some tests and numerical analyses.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 ・ 構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：打音、表面振動、鋼板接着、診断

1. 研究開始当初の背景

我が国は、平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震以降、RCラーメン高架橋の柱部材を対象に、鋼板巻き立て補強などの耐震補強を実施している。平成16年10月23日に発生した新潟県中越地震では、鋼板巻き補強された柱部材は著しい損傷は無く、その補強効果が示されたものと言える。しかしながら、鋼板で巻かれたコンクリート内部の健全度・経年劣化状態や鋼板とコンクリートの付着状態を定期的に点検しておらず、その安全性や補強効果の継続性については問題視せざるを得ない。鋼板で巻かれた内部コンクリートの定期点検が実施されていない理由は、

①点検診断技術が確立されていないこと、②巻き立て内部のコンクリートが経年的に劣化することはないという間違った見解がなされていたこと、の主に2点挙げられる。予防保全的維持管理の概念に基づき、鋼板のように異種材料で覆われたコンクリート部材の点検診断技術を確立することは急務であると考えられ、さらには、それら全ての部材の点検診断を実施し、損傷度を定量的に明らかにするべきである。

2. 研究の目的

本研究は、建設後50年以上の橋梁数が2026年度に全橋梁の約47%に達するという将来予

測を踏まえて、構造物の「事後的維持管理」ではなく「予防保全的維持管理」の概念に基づき、鋼板巻き立て補強された RC 橋脚の健全度や経年劣化の「低コストで簡易な信頼性の高い点検診断技術」を確立することを最終的な目標とするもので、その方法として、打音と表面振動と弾性波の相関性に着目したものである。具体的には以下の3つの目的のもとに研究を遂行する。

(1) 内部に人工欠陥を有する「鋼板巻き補強コンクリート供試体」を用いた供試体実験及び大規模シミュレーションを実施することで、内部欠陥と打音特性、表面振動、弾性波との関係性を把握する。

(2) 鋼板で巻き立てられたコンクリートの内部欠陥の有無や大きさを判断可能な特徴量関数の提案を行う。ここで、特徴量関数とは打音特性（音圧・周波数・減衰性・スペクトル値）、表面振動（加速度・周波数・減衰性・スペクトル値）・弾性波からなる多変数関数（特徴量を基底とした多次元空間）のことである。

3. 研究の方法

(1) 人工欠陥を模擬したモルタル及びコンクリート供試体を用いた打撃試験

実験対象は 10×10×40cm のコンクリート角柱供試体とし、打撃面には鋼板をモルタルで貼付した。また、本実験で模擬欠陥として、空隙、付着切れ、内部欠陥、経年劣化（圧縮強度を約 1/2 にして製作したもの）を仮定した。空隙とは、鋼板とコンクリートの付着部のモルタルが打撃面付近で充填されていないもの、付着切れとは、鋼板とモルタル接合部の打撃面付近にビニルを設置したもの、内部欠陥とは、コンクリート供試体内の深さ方向 2cm の位置に EPS 材（5×10×2cm）を埋設したものである。空隙、剥離に関しては鋼板厚 1mm、3mm、6mm それぞれ一体ずつ、健全、内部欠陥、経年劣化に関しては鋼板無、鋼板厚 1mm、3mm、6mm それぞれ一体ずつ製作し、計 18 体を製作した。欠陥を模擬した鋼板接着コンクリート供試体のイメージを図-1 に示す。なお、実験で使用したコンクリートの圧縮強度は 46.8MPa、静弾性係数は 32.5GPa であった。実験のイメージを写真-1 に示す。打撃ハンマはインパルスハンマとし、打撃点は打撃面中央とする。受信センサとして加速度計（周波数範囲：2Hz～10kHz）、マイクロフォンを利用した。計測におけるサンプリング周波数は 64kHz、データ数は 6400 とし、10 回打撃したデータの平均を実験結果として採用する。打撃点から水平方向に 1.5cm の位置に加速度計、2.5cm の位置にマイクロフォンを配置して計測を行った。また、本研究では打撃力によるばらつきを是正するために、

インパルスハンマによって得られた入力荷重の最大値を打撃力とし、音圧と加速度のデータを打撃力で除算することによって、単位荷重あたりの値に正規化を行ったデータを実験結果として扱うこととした。

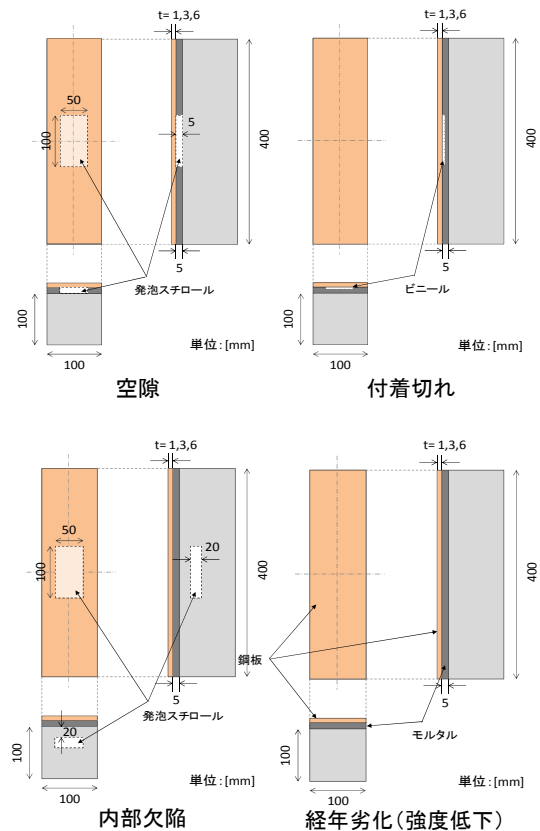


図-1 欠陥を模擬した供試体イメージ

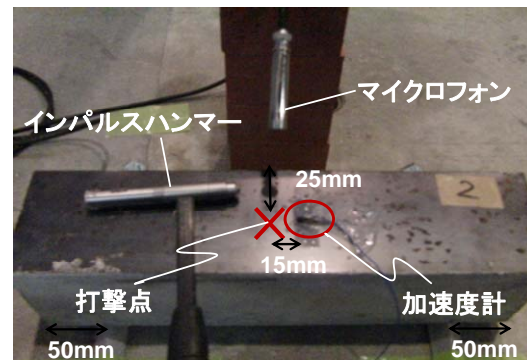


写真-1 打撃試験風景

(2) 人工欠陥を模擬したモルタル及びコンクリート供試体を用いた赤外線サーモグラフィによる試験

また、打撃試験結果の比較検証のため、同時に赤外線カメラにより赤外線画像の撮影を室内で実施した。使用した赤外線カメラはマイクロボロメータ使用の非冷却型であり、解像度は 640×480 ピクセル、検出波長は 7.5～13 μm で、温度分解能は 0.065℃である。実験手順として、供試体の検査面（打撃試験に

おける打撃面)を撮影方向に向け、欠陥面から15cm離れたドライヤー(1200w)を用いて加熱を2分間行い、加熱直後より赤外線画像の撮影を撮影間隔10秒で加熱時間の2分間も含め、計12分間実施した。この操作をそれぞれ3種類の鋼板厚がある2種類の供試体に対して行った。なお、検査面以外からの熱の出入りを防ぐため、検査面以外は断熱材として段ボールにより被覆した。赤外線カメラの撮影距離は1mである。

(3) 過渡応答解析による検討

打撃試験をモデル化した過渡応答解析を実施し、打撃音と表面振動などの相関性を確認するとともに、欠陥の影響を予測可能か否か評価した。解析には、構造解析用有限要素法汎用ソフトであるMSC.MARCを用い、適宜、ユーザーサブルーチンを導入することで対応することとした。解析モデルの一例を図-2に示す。

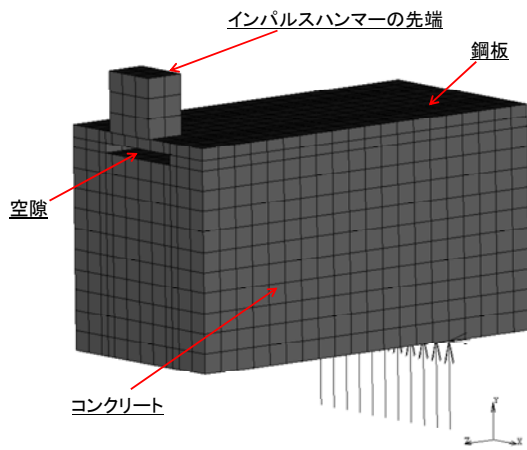


図-2 解析モデルの一例

ならびに、過渡応答解析により得られた結果を音響解析における入力値として用いるユーザーサブルーチンの作成を試み、構造-音響連成解析の基盤を構築した。

4. 研究成果

(1) コンクリート供試体を打撃して得られる特徴量の基礎的傾向

① 打音特性に与える打撃位置の影響

図-3に各打撃面におけるピーク周波数を示す。図から、ピーク周波数は自由表面の面積に依存していると考えられ、打撃位置の違いは打音特性に与える影響の要因の一つとして考えられるという結果となった。

② 打音特性に与える母材強度の影響

音圧の減衰時間においては、低強度では0.0141(s)、中強度では0.0235(s)、高強度では0.0057(s)となり、強度との関係性は見られないと考えられる。音圧のピーク周波数においては、低強度の場合、1050Hz、中強度の

場合、1150Hz、高強度の場合、1200Hzとなった。このことから強度が高くなるほどピーク周波数が高くなるという結果を示した。これらの傾向は、加速度応答からも確認でき、音圧と加速度(表面振動)は非常に相関が強いことがわかった。以上の結果から、コンクリート供試体と言えども強度や打撃位置によって、打音特性が異なることを十分に考慮しておく必要がある。

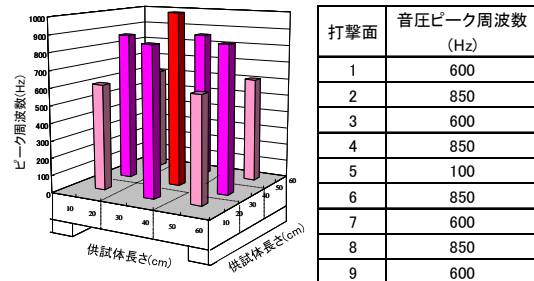


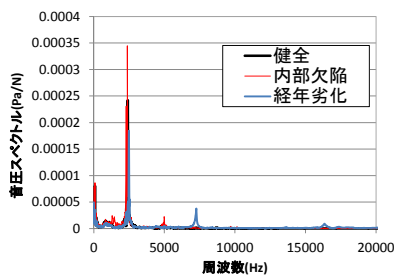
図-3 打撃位置の影響

(2) 様々な欠陥を有する鋼板付着コンクリート部材への打撃試験による検討結果

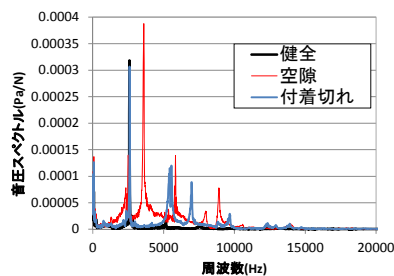
結果の一例として、図-4に打撃音の周波数特性を示す。まず、図-4(a)には鋼板を接着していないケースの結果を示しているが、鋼板を接着していない場合、内部欠陥の有無や強度にかかわらず、2.4kHzで周波数が卓越することが確認できた。つまり、今回設定した内部欠陥の有無や強度の違いは鋼板接着しない場合でさえ、打音によって判別することは困難であることが確認できた。次に、図-4(b)~(d)にそれぞれ接着した鋼板厚さ1mm、3mm、6mmの健全、空隙、付着切れの場合の結果を示す。これらの図から、まず、鋼板厚さが6mmになると空隙や付着切れを判別することは困難であることがみてとれる。さらに、1mmの場合に着目すると、空隙がある場合は卓越する周波数が3.5kHzと高くなるとともに、5kHz~10kHzという高周波数帯にも第二、第三の卓越周波数が表れることが確認できた。一方、付着切れがある場合は、第一の卓越周波数は健全の場合と変わらないが、空隙と同様、5kHz~10kHzという高周波数帯にも第二、第三の卓越周波数が表れることが確認できた。この傾向は、鋼板厚さ3mmの場合にも健全との差として表れるが、その差は小さくなる。以上をまとめると、今回設定した供試体では、鋼板厚さ1mmの場合は、空隙と付着切れなどの欠陥種別までも打撃音の周波数特性で判別可能だが、鋼板厚さ3mmの場合は、欠陥の有無のみ判別可能と言える。紙面の関係上、割愛しているが、加速度波形についても同様の見解を得ることができた。

図-5は欠陥種類が空隙、付着切れの時の表面温度の時間変化である。実験結果より鋼板厚が1mmで欠陥種類が空隙の場合、加熱開始直後より、欠陥部と健全部とで温度変化が出

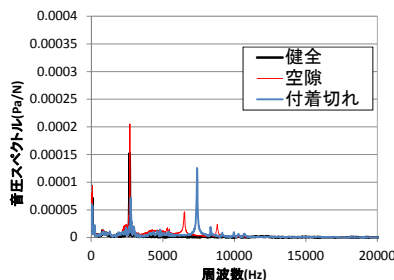
ていることが確認される。この場合、鋼板厚が 3mm, 6mm となっても同様の結果が得られた。これより、本研究の範囲内であれば、表面温度の時間変化により鋼板厚さ 6mm であれば、空隙の検出は可能であることが確認できた。また、鋼板厚が 1mm で欠陥種類が付着切れの場合、加熱直後に健全部と欠陥部の間に微小の変化は見られたが、その後の温度差はほとんど変化がなかった。この結果は、鋼板厚が 3mm, 6mm の場合も同様の結果だったため、表面温度の時間変化による付着切れの検出は困難といえる。しかし、製作において付着切れ状態を適切に再現できていたか否かを確認する必要があるといえる。



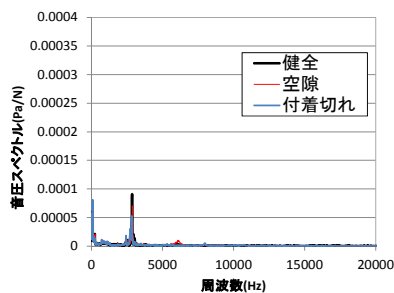
(a) 鋼板なし



(b) 鋼板 1mm



(c) 鋼板 3mm



(d) 鋼板 6mm

図-4 打撃音の周波数特性

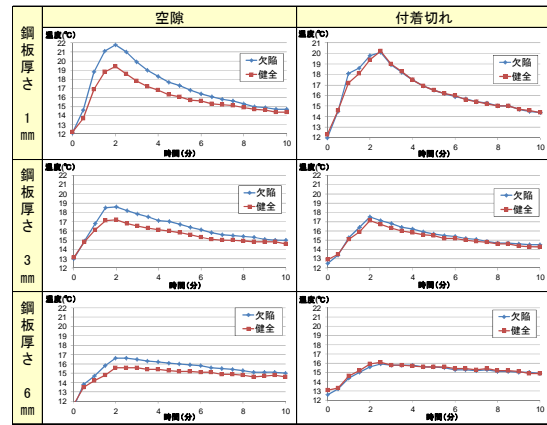


図-5 表面温度の時間変化

(3) 今後の展望

本研究により、鋼板のように異種材料で覆われたコンクリート部材の健全度を打音や表面振動で評価する際の特徴量を抽出することができた。しかし、覆う鋼板の厚さなど様々な要因において、適用限界があるため、信頼性の高い合理的な診断手法を構築するには、実部材の調査によりデータを蓄積することと、今以上の解析技術が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1件)

(1) 中山慎也・玉井宏樹・坂田力、
コンクリートの欠陥状態が判別可能な打音特徴量関数の提案に向けた基礎的研究、
コンクリート工学年次論文集、
査読有り、
Vol. 33, No. 1, 1811-1816, 2011. 07。

〔学会発表〕(計 1件)

(1) 玉井 宏樹・福田龍之介、
鋼板巻き立て RC 部材の点検への非破壊検査法の適用に関する基礎的研究、
平成 24 年度土木学会西部支部研究発表会、
2013. 03. 09、
熊本大学。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

玉井 宏樹 (TAMAI HIROKI)
九州大学・工学研究院・助教
研究者番号：20509632

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし