(37) 鋼板で覆われた床版の非破壊検査

磯光夫[1]・久保田和徳[2]・越後滋[3]・橘吉宏[4]・歌川紀之[5]・中島章典[6]

[1]正会員　川田工業 技術研究所（〒321−3325 栃木県芳賀郡芳賀町芳賀台 122−1）
E-mail: m.iso@kawada.co.jp
[2]橋梁メンテナンス 技術営業部（〒114−8506 東京都北区滝野川 6−3−1）
E-mail: k.kubota@hashi-mente.co.jp
[3]フェロー　川田工業 技術研究所（〒321−3325 栃木県芳賀郡芳賀町芳賀台 122−1）
E-mail: s.echigo@kawada.co.jp
[4]正会員 川田工業 橋梁事業部東京技術部（〒114−8562 東京都北区滝野川 1−3−11）
E-mail: yoshi.tachibana@kawada.co.jp
[5]正会員　佐藤工業 技術研究所（〒243−0123 神奈川県厚木市森の里青山 14−10）
E-mail: utagawa@satokogyo.co.jp
[6]フェロー　宇都宮大学 教授（321−8585 栃木県宇都宮市陽東 7−1−2）
E-mail: akinorin@cc.utsunomiya-u.ac.jp

鋼板で覆われた床版は，鋼板上面の空隙や滞水などの状態を目視により確認できない．そこで，床版の長寿命化を図るために非破壊検査技術の打音法に着目し，合成床版の底鋼板とコンクリート間の剥離や滞水状態や鋼板接着補強床版における再劣化状態を，打音法によって把握することを目的に，実物大供試体を用いて試験を行った．その結果は，打撃音の第 1 波の振幅比と周波数分布により鋼板上面の健全，剥離および滞水などの状態を把握することができるとともに，そのための閾値が設定できた．また，設定した閾値を用いて供用中の合成床版の状態を調べ，大きな損傷が生じていないことを確認した．

Kew Words: *steel plate concrete composite deck, impact acoustics, non-destructive inspection, water-bearing, amplitude ratio*

1. まえがき

鋼板で覆われた床版には，鋼板または形鋼とコンクリートが一体となって荷重に抵抗するように構成された鋼コンクリート合成床版（以下，合成床版とする）や劣化した RC 床版の下面側に鋼板をエポキシ樹脂接着剤で接着して一体化した鋼板接着補強床版などがある．

合成床版は，既往の輪荷重走行試験結果などから，優れた耐久性を有することが確認されているが，不測の損傷により，床版内へ水が浸入した場合，他のコンクリート床版と同様に耐久性の低下が懸念される．現在までこのような損傷に至った合成床版の報告はされていないものの，防水層が損傷した場合を想定して，合成床版の底鋼板上の滞水を検査する方法の確立は，合成床版の耐久性を確保する上で重要なことである．その検査は，底鋼板に設けたモニタリング孔により行われてきたが，剥離や滞水範囲を特定するためには，非破壊検査技術の開発が必要である．

また，劣化した RC 床版の下面側に鋼板を接着した鋼板接着補強床版は，鉄筋量の不足を補うことができ，曲げ耐荷力の増加とひび割れにエポキシ樹脂が充填されることによるせん断耐力の回復という効果が得られる．しかし，近年この鋼板接着補強床版が，鋼板で床版下面が覆われていることから，桁下からの目視点検で再劣化を発見できないことなどにより，床版コンクリートの抜け落ち事故が発生している．鋼板接着補強床版が再劣化した場合には，補強鋼板とコンクリート間のエポキシ樹脂に剥離が生じるとともに，路面からの雨水が床版のひび割れなどから浸透し補強鋼板上面に滞水して床版に悪影響を及ぼす可能性がある．したがって，鋼板接着補強床版も合成床版と同様に剥離や滞水範囲を特定するためには，非破壊検査技術の開発が必要である．

このように，鋼板で覆われた床版は，桁下空間か

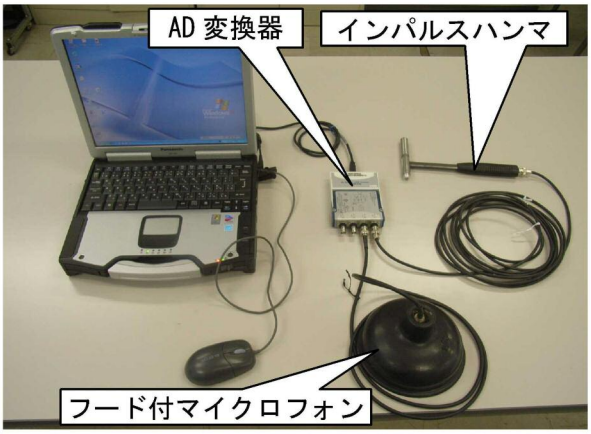


写真-1　打音検査装置

らの目視により確認できないため，床版の劣化を促進させる滞水を非破壊検査などにより，早急に把握することが大切である．非破壊検査とは，ものを壊さずに構造物のある有害な損傷などを検出する技術である．ものを壊さずに有害な損傷を見付けるために，超音波やX線などの様々な手法があるが，ここでは打音法に着目した．打音法は，コンクリート構造物や沈埋トンネルなどの非破壊検査において使用されているものの，鋼板で覆われた合成床版などには適用されていない[1)-3)]．

本研究では，打音法の鋼板で覆われた床版検査への適用性を検討するために次のことを行った．

1）合成床版の剥離間隙と剥離断面積の異なる12種類の剥離を有する実物大供試体を製作し，底鋼板の剥離断面中心部を打撃して，剥離間隙と剥離断面積の変化による打撃音の相違を分析して，合成床版における非破壊検査の判定精度の向上を図った．また，これらの結果をもとに，供用中の橋梁も調査を行った．

2）鋼板接着補強床版の再劣化状態を確認するために，非破壊検査によりエポキシ樹脂と鋼板間およびコンクリート間の剥離または滞水状態を把握することを試みた．

本文は，それらの結果について述べるものである．

2. 打音法の概要[4)-10)]

(1) 測定方法

ここでは，打音検査装置を開発して検査を行った．打音検査装置は，写真-1に示すようにインパルスハンマ，フード付きマイクロフォン，AD変換器およびノートパソコンにて構成されている．測定方法は，鋼板の表面をインパルスハンマで打撃したときに生じる合成床版などの打撃音を，フード付きマイクで収録した．打撃音の波形分析方法は，計測やシミュレーションに適したプログラム言語のLabVIEWを用いて，測定した振幅比から高速フーリエ変換によってフーリエスペクトル（以下，フーリエ振幅とする）に変換するなどの波形処理プログラムを開発し，振幅比の波形，周波数分布の卓越振動数やフーリエ振幅などに着目して，鋼板とコンクリートの健全状態，剥離状態および滞水状態を検討した．打音検査装置の電源は，内蔵のバッテリーから供給されるため，外部電源を必要としない．

(2) 打撃音の評価手法

打撃により各部に伝播した弾性波による音響放射の中には，板の曲げ振動などが存在する．ハンマで薄い板を叩くと曲げ振動が卓越して大きな音が発生し，逆に厚い板を叩くと曲げ振動が生じにくいために大きな音が発生しない．つまり，鋼板とコンクリートの間における健全，剥離および滞水などの状態変化により曲げ振動より生じる音の大きさの違いが現象として現れる．打撃音の評価方法は，まず第1波の振幅比に着目して判断する．判断できない場合には，周波数分布における卓越した周波数やフーリエ振幅の最大値などに着目して評価した．

3. 合成床版における非破壊検査[11)]

(1) 研究目的

実橋において底鋼板を打撃して非破壊検査を行う場合には，底鋼板上の剥離間隙や剥離断面積などの状況は全く不明である．その状況において，底鋼板の打撃音により特に滞水状態を把握することは容易でない．ここでの研究目的は，合成床版の暴露供試体を用いた試験結果[9)]をもとに，剥離間隙と剥離断面積の変化による打撃音の相違を分析して，打音法による合成床版の非破壊検査の閾値を求めて判定精度を向上させることである．また，ここで求めた閾値をもとに供用中の合成床版を調査することである．

(2) 研究方法

供試体は，写真-2～4に示すように剥離と滞水状態を作り出すために，給排水用の2本の鋼製パイプを有する板厚22mmの剥離作成用鋼板を用いた実物大のものである．剥離間隙は，写真-2の赤い部分に示すように剥離作成用鋼板の四隅に幅5mmで厚さ0.04mmまたは0.16mmの両面テープを貼付した2種類とした．コンクリート打設時に剥離間隙部へ水

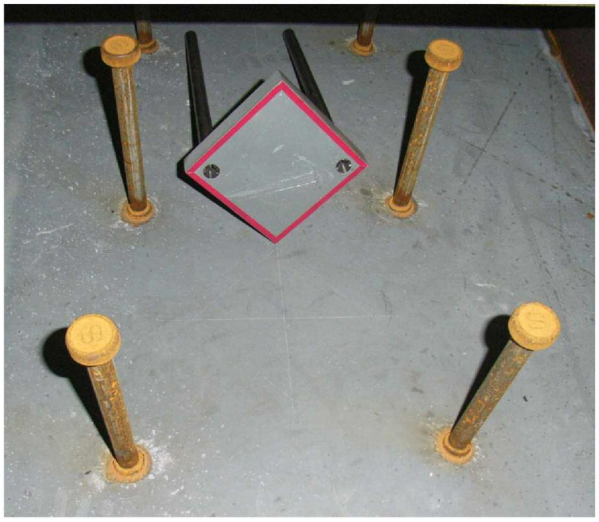


写真-2　剥離間隙用の両面テープ

写真-3　剥離間隙部のシール処理

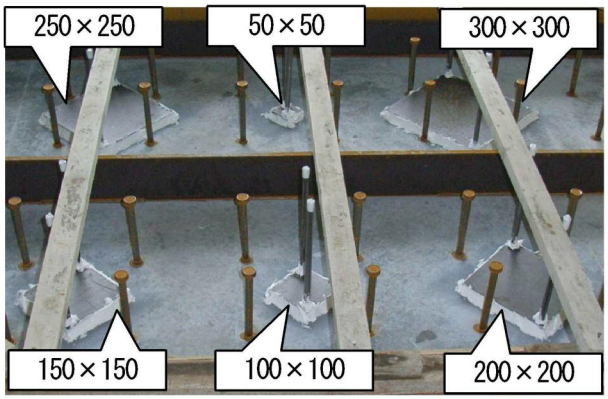


写真-4　6 種類の剥離形状

写真-5　注水による滞水状態

が侵入しないようにするために，スタッド間の中央部に設置した鋼製パイプと剥離作成用鋼板を写真-3に示すようにシール処理した．剥離形状は，写真-4に示すように一辺が 50～300mm の 6 種類の正方形とした．コンクリート硬化後において剥離間隙部に水が入っていない状態を剥離，写真-5 に示すように片側の鋼製パイプからスポイトを用いて水道水を注入して片側のパイプから水があふれ出した状態を滞水，それ以外の異常のない状態を健全とした．合成床版における底鋼板とコンクリートの健全，剥離，および，滞水状態を把握するために，写真-6 に示すように打音検査装置を用いて底鋼板の剥離断面中心部をインパルスハンマで打撃したときの打撃音をフード付きマイクで測定し，振幅比や周波数分布などに着目して分析した．

ここで求めた閾値の有効性を確認するために，日本橋梁建設協会における供用 27 年および 18 年を経た合成床版の経年調査に参加した[12),13)]．

(3) 結果とその考察

剥離間隙が 2 種類，剥離断面積が 6 種類の合計 12 種類の剥離を用いて，打音法による合成床版の健全，剥離，および，滞水状態の評価のための閾値を求めた結果を**図-1** および**表-1** に示す．**図-1a**）は合成床版における振幅比とフーリエ振幅の相関を調べるために，横軸に振幅比，縦軸にフーリエ振幅および閾値を示したものである．**図-1b**）は周波数とフーリエ振幅の相関を調べるために，各打撃音の周波数分布において最も大きく卓越した波形の最大値に着目し，その卓越した周波数の値を横軸に，フーリエ振幅の値を縦軸に示した．**表-1** は**図-1** から得られた閾値などの結果を表にまとめたものである．これらの結果より，次のことがわかった．

底鋼板の直上の状態が健全状態の場合には，**図-1a**）に示すように第 1 波の振幅比が-0. 020 以上，

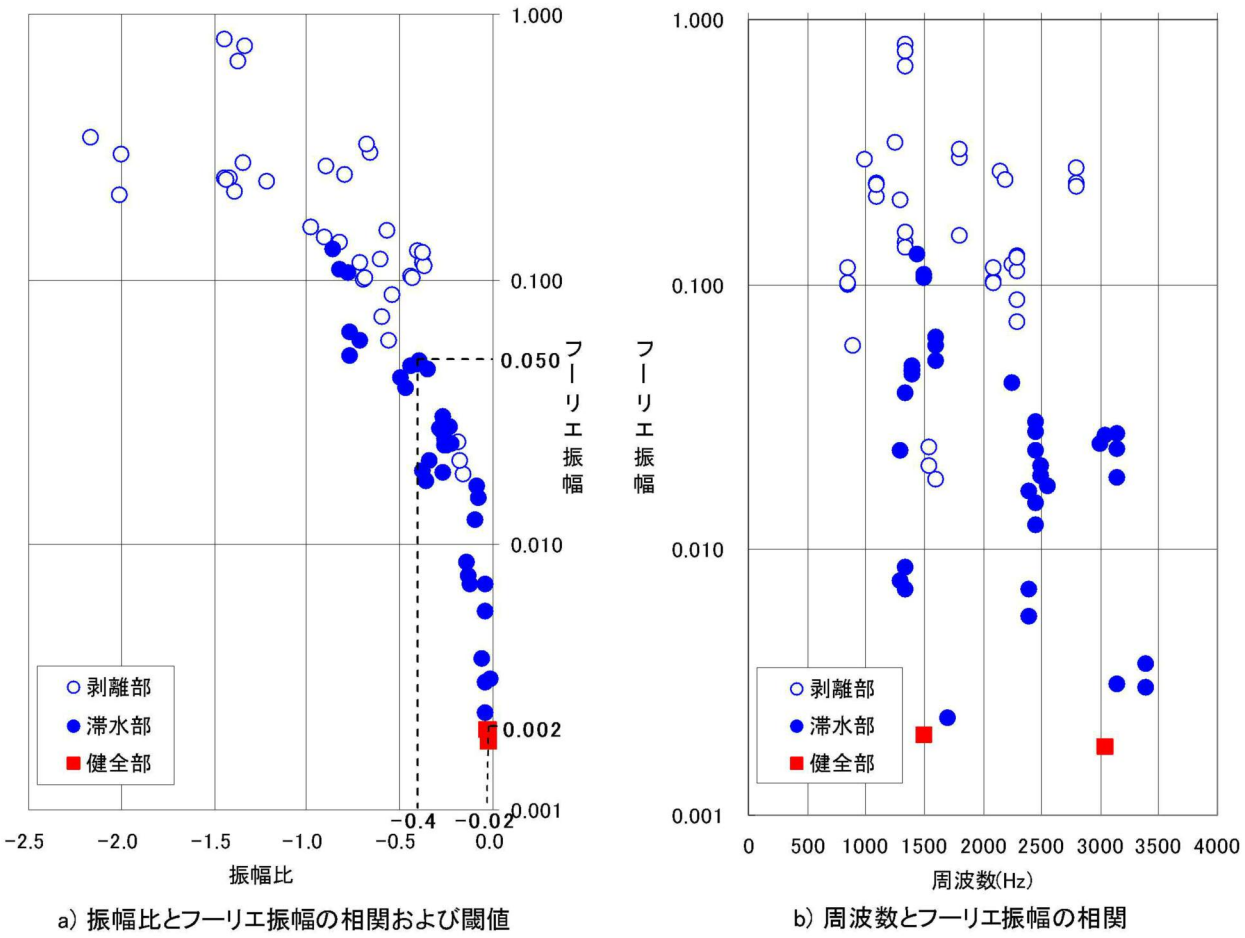


図-1　合成床版における相関図

表-1　合成床版における打音検査の状態評価のための閾値

合成床版の状態	第 1 波振幅比	フーリエ振幅の最大値	周波数分布の特徴
健　　全	-0. 020 以上	0. 002 以下	全般的に分布
剥　　離	-0. 400 未満	0. 050 より大きい	2500hz 以下で卓越することが多い
滞　　水	-0. 020～-0. 400	0. 002～0. 050	周波数が分散することが多い

フーリエ振幅が 0. 002 以下と極めて小さく，図-1b）に示すように卓越周波数が 1500Hz あるいは 3000Hz に存在する．滞水状態は，第 1 波の振幅比が -0. 020～-0. 400，フーリエ振幅が 0. 002～0. 050 で，健全状態と剥離状態の中間的な値を示す．剥離状態は，第 1 波の振幅比が-0. 400 未満，フーリエ振幅が 0. 050 より大きく，周波数が 2500Hz 以下において卓越することが多い．

これらの打音法による合成床版の状態評価のための閾値を用いて，日本橋梁建設協会における供用 27 年および 18 年を経た合成床版の経年調査に参加した結果の詳細は文献 12），13）に譲るが，概要をまとめると次の通りである．

桁端部付近の合成床版（損傷が比較的激しいであろうと想定できる部位）を調査したにも関わらず，異常発生個所（部分的に剥離の可能性あり）がわずかであった．一方，調査結果は三手法（打音法，弾性スイープ波法，超音波法）によるものであるが，結果の相関性から非常に信頼性が高いものと考えられる[12)]．

維持管理を適切に行えば，海浜地域で供用 18 年を経ても合成床版を良好な状態に保つことができることが明らかになった．また今回用いた非破壊検査は両方（打音法，弾性スイープ法）とも同じ結果となり，両検査法の信頼性を確認できた[13)]．

これらの結果より，現場において合成床版の健全，剥離および滞水状態を確認することができた．滞水の有無については，供用中の橋梁であったため，暴露供試体のように底鋼板を削孔して確認できなかったが，他の検査方法である弾性スイープ法とほぼ同

写真-6　底鋼板の打撃状況

写真-8　補強鋼板の打撃状況

様の結果が得られたことから，閾値の有効性を確認できたものと考えている．今回調査した供用中の合成床版において部分的に滞水個所があったものの，大きな損傷は確認できなかった．

4. 鋼板接着補強床版における再劣化の非破壊検査[14)]

(1) 研究目的と方法

ここでは，合成床版で求められた打音法による非破壊検査技術の閾値など参考にして，鋼板接着補強床版の再劣化状態を把握できるようにすることを目的とする．鋼板接着補強床版の再劣化状態を想定した供試体を製作し，打音検査装置を用いて供試体の表面の打撃音を測定した．

写真-7　再劣化を再現した供試体

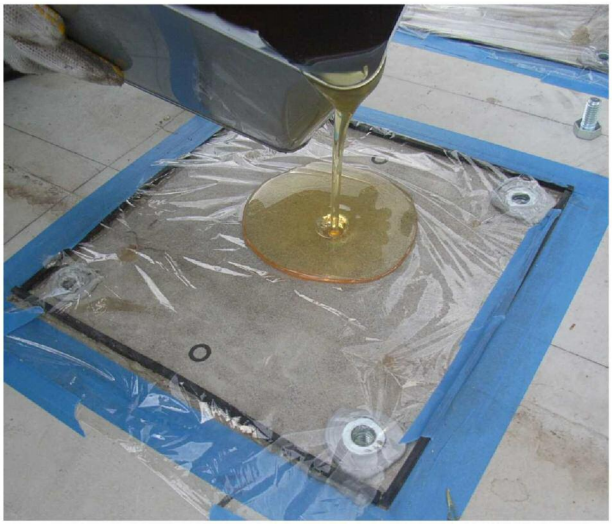
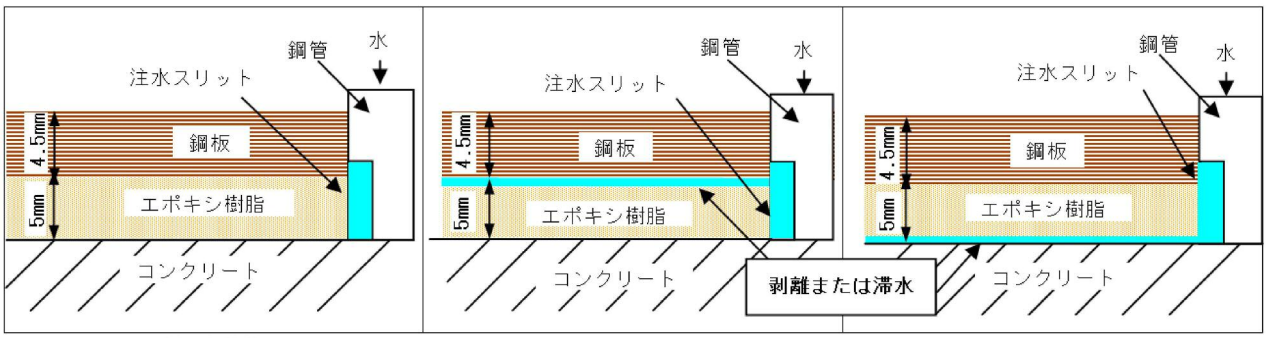


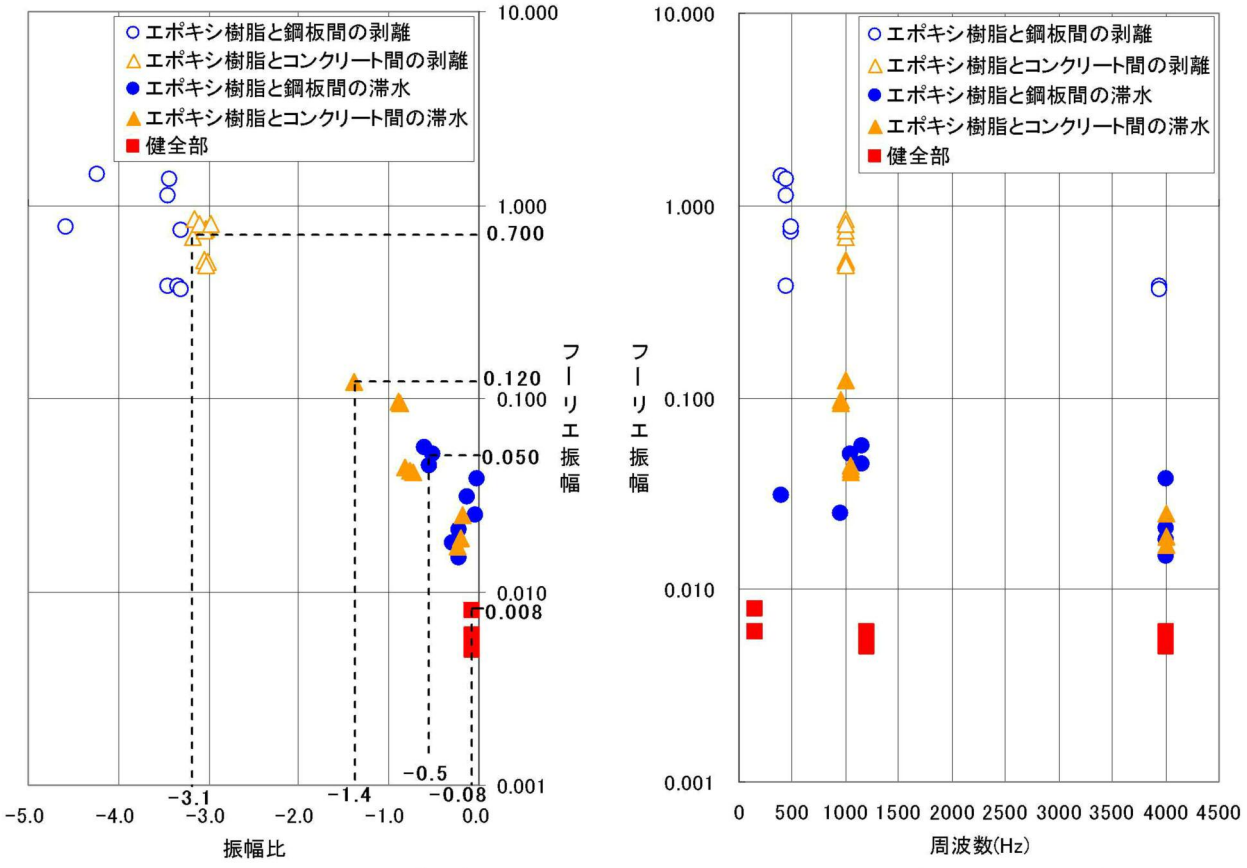
写真-9　剥離を有する供試体の製作例

具体的には，写真-7 に示すように床版を想定したコンクリート版上に，3 タイプの供試体を 3 体ずつ設置し打音検査装置を用いて，写真-8 に示すように補強鋼板表面の中央部をインパルスハンマで打撃したときに生じる打撃音をフード付きマイクで収録した．収録した打撃音は，LabVIEW を用いた波形処理プログラムにより波形分析して，鋼板接着補強床版の再劣化状態の判断に利用した．鋼板接着補強床版の供試体は，図-2 に示すように健全状態，エポキシ樹脂と鋼板間あるいはエポキシ樹脂とコンクリート間の剥離または滞水状態のものを，ここではコンクリート上面に設置した．補強鋼板は，実橋に用いられているものを想定して，大きさが 300 × 300mm で，厚さが 4. 5mm のものを使用した．補強鋼板とコンクリートの接着のために，厚さ 5mm のエポキシ樹脂を用いた．剥離状態は，ここでは写真-9 に示すようにラップを用いてエポキシ樹脂接着剤と鋼板またはコンクリートが付着しないようした．供試体の滞水状態は，写真-10 に示すように片方の鋼管からス



a) 健全状態　b) 樹脂と鋼板間の剥離または滞水状態　c) 樹脂とｺﾝｸﾘｰﾄ間の剥離または滞水状態

図-2　鋼板接着補強床版の供試体概要図



a) 振幅比とフーリエ振幅の相関および閾値　b) 周波数とフーリエ振幅の相関

図-3　鋼板接着補強床版における相関図

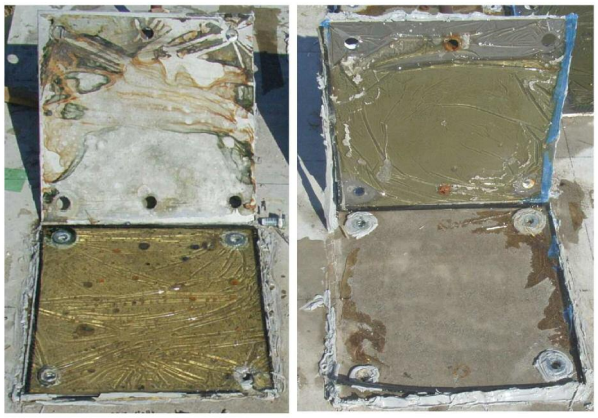
ポイトにより水を注入し，もう一方の鋼管から水が上がってくることを確認して，剥離部が水で充填されたものと判断した．供試体の剥離や滞水状態を確認するために，供試体の製作約 1ヵ月後に解体したものを写真-11 に示す．これらより，想定通りの剥離および滞水が生じていることを確認した．

(2) 結果とその考察

鋼板接着補強床版の再劣化を想定した供試体を用いて，打音法による鋼板接着補強床版の健全，エポキシ樹脂と鋼板間の剥離と滞水状態，エポキシ樹脂とコンクリート間の剥離と滞水状態の評価のための相関を調べた結果を図-3 に示す．図-3a）は鋼板接着補強床版における振幅比とフーリエ振幅の相関を調べるために，横軸に振幅比，縦軸にフーリエ振幅および閾値を示したものである．図-3b）は周波数とフーリエ振幅の相関を調べるために，各打撃音の周波数分布において最も大きく卓越した波形の最大値に着目し，その卓越した周波数の値を横軸に，フーリエ振幅の値を縦軸に示した．これらの結果より，次のことがわかった．

合成床版における実験供試体と異なり，剥離の断面は 300 × 300mm のみで実験しており，合成床版のデータ数と比較すると鋼板接着補強床版のデータ数

写真-10　滞水状態の作り方



a) 樹脂と鋼板間剥離　b) 樹脂とｺﾝｸﾘｰﾄ間剥離

写真-11　供試体の剥離状態

は少ない．しかし，鋼板接着補強床版の振幅比とフーリエ振幅の相関は，数値的な相違があるものの合成床版の相関とほぼ同様の傾向を示している．図-3a）に示すように健全状態は振幅比の波形およびフーリエ振幅が極めて小さく，図-3b）に示すように周波数が広範囲に分布する．剥離状態は振幅比およびフーリエ振幅が，エポキシ樹脂とコンクリート間の値より，エポキシ樹脂と鋼板間の値の方が大きく，周波数が 500 から 1000Hz で卓越する．滞水状態は振幅比およびフーリエ振幅が，剥離状態とは反対に，エポキシ樹脂とコンクリート間の値より，エポキシ樹脂と鋼板間の値の方が小さい．

以上のことにより，エポキシ樹脂の補強鋼板側またはコンクリート側のどちら側に剥離または滞水が生じているかもほぼ確認することができ，打音法による非破壊検査技術が鋼板接着補強床版の再劣化状態の把握に利用できることがわかった．

5. まとめ

打音法による非破壊検査技術を用いて打音検査装置を開発し，鋼板で覆われた合成床版のコンクリートの状態を把握するとともに，鋼板接着補強床版の再劣化状態を確認するための試験を行った結果，次のことがわかった．

1）合成床版の暴露供試体および 12 種類の剥離を有する実物大供試体の試験により，打音法により求めた振幅比，フーリエ振幅は，底鋼板とコンクリートの健全，剥離，滞水時で値が大きく異なるため，その状態の判断が可能であり，そのような判断をするための閾値の設定をすることができた．

2）日本橋梁建設協会における供用 27 年および 18 年を経た鋼コンクリート合成床版の経年調査に参加した結果，今回求めた閾値を用いて供用中の合成床版の状態が把握できることを確認した．また，合成床版の底鋼板に部分的な滞水個所があるものの，大きな損傷が生じていないことも確認できた．

3）鋼板接着補強床版の供試体を用いた試験により，エポキシ樹脂と底鋼板またはコンクリート間の健全，剥離，滞水時で値が大きく異なるため，その状態の判断が可能であり，再劣化の状態が把握できた．

6. あとがき

今回は，打音法によって鋼板で覆われた合成床版の底鋼板上面の状態，および，鋼板接着補強床版の再劣化の状態を把握するために，実物大供試体を用いて試験を行い，健全，剥離，滞水状態を把握できることがわかった．今後は，供用中の橋梁における合成床版の点検や供試体を用いた試験などによりデータを蓄積して判定の精度をさらに向上させたい．また，実際の鋼板接着補強床版における再劣化状態は，エポキシ樹脂とコンクリートとの付着や補強鋼板の腐食などにより複雑な打撃音が発生し，評価が難しいものと思われる．今後は，実際に劣化した鋼板接着補強床版よりデータを収集して，検査精度の向上を図りたい．

参考文献

1)　伊東良浩：打音法によるコンクリート構造物の非破壊検査に関する研究，東京大学学位論文，1997

2) 壱岐直之，清宮理，星野聡志，越村幸直：合成部材での未充填部の打音検査，コンクリート工学年次論文集，Vol. 23，No. 1，PP. 595−600，2001
3) 秋山哲治，清宮理，北沢壮介，白石修章：合成部材での未充填部の打音法検査に関する実物大実験，コンクリート工学年次論文集，Vol. 24，No. 1，PP. 1677−1682，2002
4) 魚本健人，伊東良浩：打音法によるコンクリート構造物の非破壊検査，コンクリート工学論文集，第 7 巻第 1 号，pp. 143−151，1996. 1
5) 歌川紀之，伴亨，北川真也：打音法における欠陥検知に関する一考察，土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集，Ⅴ−383，pp. 765, 766，2003. 9
6) 伴亨，歌川紀之，森濱和正：RC 構造物への打音法の適用，コンクリート工学年次論文集，Vol. 26，No. 1，2004
7) 木村真二，吉尾泰輝，伊藤剛，伴亨:打音法を用いた合成床版の検査手法に関する考察，土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集，pp. 117, 118，2006. 9
8) 辻角学，橘吉宏，伊藤剛，小笠原照夫，伴亨，越後滋:打音法による合成床版の滞水判定，土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集，pp. 119, 120，2006. 9
9) 磯光夫，久保田和徳，越後滋，橘吉宏，伴亨，歌川紀之：打音法による合成床版の非破壊検査手法，土木学会第 6 回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp. 249−254，2008. 6
10) 磯光夫，久保田和徳，越後滋，橘吉宏，伴亨，歌川紀之：打音法による合成床版の非破壊検査手法に関する研究，土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集，pp. 65, 66，2008. 9
11) 磯光夫，橘吉宏，越後滋，久保田和徳，伴亨，歌川紀之：合成床版の打音法における評価手法，土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集，pp. 81, 82，2010. 9
12) 林暢彦，野呂直以，吉良浩二：供用 27 年を経た鋼・コンクリート合成床版の経年調査結果，土木学会第 6 回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp. 243−248，2008. 6
13) 春日井俊博，野呂直以，石川孝，土井保彦：供用 18 年を経た鋼・コンクリート合成床版の経年調査結果，土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集，pp. 737, 738，2009. 9
14) 佐藤義則，磯光夫，橘吉宏，越後滋，歌川紀之，中島章典：打音法による鋼板接着補強床版の非破壊検査に関する研究，土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集，2011. 9.（投稿中）

STUDY ON NON-DESTRUCTIVE INSPECTION OF SLAB COVERD WITH STEEL PLATE

Mitsuo ISO, Kazunori KUBOTA, Shigeru ECHIGO, Yoshihiro TACHIBANA, Noriyuki UTAGAWA, Akinori NAKAJIMA

In the slab covered with steel plates, the defects such as existence of cavities filled with air or water between concrete and the bottom steel plates cannot be viewed. A study purpose is to grasp a state of hardened concrete on the bottom steel plates of steel-concrete composite decks and a state of the re -deterioration of steel plate adhesion reinforcing slabs by impact acoustics methods, for the extension of life of the slabs. The study method is to examine life-size test specimens. As a result, analyzing the frequency distribution and the amplitude ratio of the first wave of the blow sound disclosed thresholds which leads to grasp the state, such as fitness, detachment and water-stagnant. In addition, I grasped a state of the steel-concrete composite decks of the in- service bridges and discovered no big damages using this threshold.