報告 供用中の鋼板接着補強 RC 床版における弾性波による内部損傷の非 破壊調査

一色 智彦*1·鈴木 真*2·藤原 理絵*3·鎌田 敏郎*4

要旨:道路橋 RC 床版の補強工法の一つとして,鋼板接着工法がある。本工法では,RC 床版の下面に対して ほぼ全面に鋼板を設置するため,点検において,外観目視により補強後の床版内部の状況を把握することが 困難である。そこで本研究では,補強後18年が経過した実橋 RC 床版に対して,弾性波による非破壊試験を 適用し,床版内部の損傷状況を把握する方法について検討した。本稿では,RC 床版の上面および下面から衝 撃弾性波法による調査を実施した結果についてそれぞれ述べるとともに,上下面両面からの評価結果に基づ き床版内部の損傷状況を適確に推定するための考え方について示す。

キーワード:鋼板接着工法, RC 床版,非破壊調査,衝撃弾性波法,水平ひび割れ

1. はじめに

道路橋 RC 床版の補強工法として, 鋼板接着工法が採 用されてきた。この工法が施された床版では, 既設コン クリート内部への継続的な雨水の侵入と通行車両による 輪荷重の繰返し載荷の影響により,補強後においても床 版内部の損傷(水平ひび割れ等)が進展する事例が確認 されている。鋼板接着後は,床版内部の状況は床版下面 からの外観目視では把握が困難になるため,損傷の進行 に気付かず対策が遅れてしまうケースもあり得る。した がって,こうしたケースを未然に防止するためには,点 検において何らかの非破壊試験を適用し, RC 床版内部 の状況を適確に把握することが重要である。しかしなが ら,鋼板接着工法を施した RC 床版に対する非破壊評価 方法は,未だ確立されていないのが現状である。

そこで本研究では、弾性波に基づく手法に着目し、供 用下にある鋼板接着 RC 床版内部において、床版内部の 損傷状況を把握する方法について検討した。具体的には、 床版上面および下面の両面において衝撃弾性波法を適用 し、床版内部の主たる変状としての水平ひび割れを対象 として、上下面それぞれにおける検出性能を評価した。 さらに、上下面両面での測定結果を併用することにより、 床版内部の損傷状況を適確に推定する方法について検討 した。

2. 非破壊調査の概要

本研究では,兵庫県神戸市内の主要幹線道路に位置するA橋(連続鋼鈑桁橋)におけるRC床版を対象とした。 図-1に現況を示す。本橋では,約18年前にRC床版に対する鋼板接着補強が施されており,その後,詳細点検 等の結果より,床版内部の損傷が進行していることが懸 念された。そのため,損傷の進行状況や,さらなる補修・ 補強の必要性について判断する必要性が生じ,非破壊試 験を適用した調査を実施することとした。非破壊調査の 方法には,測定作業が比較的簡易で,コンクリート中の 鉄筋や粗骨材の影響を受け難い衝撃弾性波法¹⁾を適用す ることとし,床版の上面および下面から,それぞれ調査 を行った。



図-1 A橋の現況

3. 対象とした RC 床版の概要

本研究では、A橋における2径間を対象として抽出し、 調査を実施した。このうち、第一径間目(PA~PB)は、 支間長 *L*=30.100m, 幅員 *w*=27.500m (有効幅員 *w*=22.000m),第二径間目(PC~PD)は支間長 *L*=29.500m, 幅員 *w*=15.000m (有効幅員 *w*=14.000m)であり、第一径 間は 11 主桁、第二径間は 8 主桁から構成される鈑桁橋 である。両支間とも、床版厚は *t*=190mm, コンクリート の設計基準強度は *f*'_{ck} = 24 N/mm² である。先述の通り本 橋の RC 床版には平成 11 年に鋼板接着工法による補強

*1 神戸市みなと総局 技術部工務課港湾工務係 (正会員) *2 大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻 博士後期課程 (正会員) *3 大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻 博士前期課程 *4 大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻 教授 博(工) (正会員) が行われている(図-2参照)。鋼板の厚みは *t*=4.5mm で あり, RC 床版下面との接触面にエポキシ樹脂が注入さ れている。また,図-2に示すように,橋軸方向に 1m間 隔でアンカーボルトが設置されている。



図-2 鋼板接着の状況 (RC 床版下面)

4. 衝撃弾性波法の測定概要

4.1 床版上面および下面からの測定の目的

一般的に, RC 床版における水平ひび割れは,上下段の 鉄筋位置に沿って発生する場合が多い(図-3 参照)。



床版上面から衝撃弾性波法により測定を行った場合, 上段鉄筋位置に水平ひび割れがあれば,下段鉄筋位置の 水平ひび割れの検出は難しくなる。一方,床版下面から 調査を行う場合では,下段鉄筋位置に水平ひび割れがあ れば,上段鉄筋位置の水平ひび割れを検出することは難 しい。特に,鋼板と既設コンクリートとの接着が不十分 で,両者の境界面に空隙があれば,水平ひび割れの検出 精度はさらに低下してしまう。このように,衝撃弾性波 法を適用した RC 床版内部の水平ひび割れの調査では, 床版の上面および下面の両面から調査を行なうことが有 効と考えられる。

4.2 床版上面からの測定方法

床版上面からの測定は、夜間における交通規制下で、 舗装上面に加速度センサを密着させ、その近傍を小型ス チールハンマで打撃することにより弾性波を入力した。 本研究では、3Hz~30kHz においてフラットな応答感度 を持つ加速度センサを使用した。

打撃により発生した弾性波は、床版の上下面で多重反 射を繰返し、版厚に相当する特定の周波数が卓越するこ ととなる。そこで、受信された時系列波形から高速フー リエ変換により周波数分布を求め、得られたスペクトル 上に認められるピーク周波数の値を読み取ることで、版



表一1 調査数量

径間	車線数	橋軸方向	橋軸直角方向	合計
第一径間	全6車線	20測線	30測線	600測点
第二径間	全4車線	12測線	12測線	336測点
合計				936測点

厚あるいは水平ひび割れの深さを推定することが可能と なる²⁾。図-4に測定概要を、図-5に測定状況を示す。 測定点は、各径間の各車線上で橋軸、橋軸直角方向に 1m 間隔で測点を設けることを基本とした。一例として 第一径間の測点配置図を図-6 に、各径間での調査数量 を表-1 に示す。

調査数量は,第一径間の6車線について橋軸方向に20 測線(3測線/車線),橋軸直角方向に30測線,1径間当 たり600測点とした。また,第二径間の4車線について は,橋軸方向に12測線(3測線/車線),橋軸直角方向 に28測線の1径間当たり計336測点であり,2径間での 合計は936測点とした。なお,各径間にて削孔調査を行 い,受信波形のスペクトル上に明確なピークが存在する 測定点において、水平ひび割れの有無を確認した。削孔 調査の数量は、両径間とも10箇所とした。また、削孔に より採取したコンクリートコアを用いて、コンクリート の弾性波伝播速度を測定した。削孔によるコア採取は、 JISA1107「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮 強度試験方法」に準じ、直径は φ50mm とし、配筋図お よび現地での電磁波レーダによる鉄筋探査の結果に基づ き、内部鉄筋に損傷を与えないよう留意した。作業後は 孔内部を目視確認し清掃を行った後、超速乾性無収縮モ ルタルにて補修した。

4.3 床版下面からの測定方法

床版下面からの測定は、鋼板表面およびアンカーボル ト頭部において(図-7参照)、高所作業車を使用して実施した。あらかじめ、テストハンマによる打音調査を行い、測定点近傍での鋼板接着の有無を把握し、測定は鋼板が接着している箇所において行った。弾性波の受信には加速度センサ(上面からの測定で用いたものと同様のもの)を使用し、その近傍で鋼球(φ9.6mm、φ12.5mm、 φ19.0mm)による打撃を行った。



図-7 測定状況

測定は、各径間とも、比較的大型車両による交通量が 多く、床版への負荷が大きいと想定される走行車線側に おいて実施した。第一径間および第二径間の測定点配置 図を、それぞれ図-8および図-9に示す。

5. 非破壊調査の結果

5.1 床版上面からの測定結果

第一径間における測定の結果,受信波のスペクトル に上段鉄筋位置に対応したピークが認められる箇所はな かったが,下段鉄筋位置に相当するピークが出現したも のは,全600箇所のうち88箇所(14.7%)であった。 各測定点における受信波スペクトルのピーク周波数から 算出した欠陥深さの分布状況を図-10に示す。図-10 中の160≦D<205のエリアが,下段鉄筋位置における 水平ひび割れに相当する。

一方,第二径間は第一径間と同様に,上段鉄筋位置 に相当するスペクトルピークが認められる箇所はなかっ たが,下段鉄筋位置で,それが確認できた箇所は,全 336箇所のうち13箇所(3.9%)であった。欠陥深さの



図-8 第一径間の測定位置図(下面)



図-9 第二径間の測定位置図(下面)



図-10 欠陥深さのコンター図(第一径間)



図-11 欠陥深さのコンター図(第二径間)

コンター図を図-11 に示す。図-11 中の 160≦D<205 のエリアが、上記の対象領域となる。

第一径間では、欠陥箇所が全面的に分散していたが、 第二径間では、走行車線側に集中する結果となった。こ れに対して、衝撃弾性波法による調査結果から欠陥があ ると想定された範囲において、第一径間では6箇所、第 二径間では3箇所の削孔調査を行い、実際に水平ひび割



図-13 削孔調査位置図(第二径間)

れが発生していることを確認した。また、衝撃弾性波法 による調査において、ひび割れが発生していないと判定 された範囲に対しても,第一径間において3箇所,第二 径間において3箇所の削孔調査を行い,ひび割れが発生 していないことを確認した。なお、削孔調査位置を図-12 および図-13 に示す。調査結果の一例として、水平 ひび割れが認められた測定点 No.B, No.C (第一径間) および測定点 No.H, No.I (第二径間)における受信波 のスペクトルを図-14~図-17(図中の赤色矢印に併記 されている数値は、水平ひび割れの推定深さを示してい る。)に,また,削孔調査結果の一例 (No.B) を図-18 に 示す。なお、コンクリートの弾性波伝播速度は、第一径 間において 3200m/s, 第二径間において 3500m/s であっ た。さらに、上記の測定箇所における衝撃弾性波法によ る水平ひび割れの深さの推定結果を、削孔調査により実 測したひび割れ深さと対応させて表-2に示す。

5.2 床版下面からの測定結果

床版下面から鋼板を介して衝撃弾性波法を適用した場 合における受信波の周波数特性を把握するために,本調 査の事前に解析的検討を実施した。解析に用いたモデル の概要を図-19に示す。

コンクリート部材の寸法は,長さ1000mm×幅1000mm ×厚さ200mmとし,その上部に厚さ4mmのエポキシ樹 脂および厚さ4.5mmの鋼板を設けた。モデルの中央部に は,打ち込み深さ50mmのアンカーボルトを設置したも のと,ボルトのないものの2種類のモデルを作成した。 ひび割れ深さは,コンクリート底面からの距離とし, 40mmから200mm(健全)まで10mmごとに設定した。 打撃による弾性波の入力波形を図-20に,物性値を表-3に示す。



図-14 受信波スペクトル(第一径間(No.B))



図-15 受信波スペクトル(第一径間(No.C))



図-16 受信波スペクトル(第二径間(No.H))



図-17 受信波スペクトル(第二径間(No.I))



図-18 削孔調査結果の一例 (No.B)

表-2 調査結果および実測値の一覧

	⊐7 No.	実測した水平ひび	衝撃弾性波法によ	差
		割れ深さ(mm)	る調査結果(mm)	(mm)
		a	b	b-a
1	В	180	187	7
2	С	165	173	8
3	H	180	168	-12
4	Ι	170	167	-3



図-19 解析モデル概要(アンカーボルトあり)



表一3 物性値						
	密度	弾性係数	ポアソン比			
	(g/cm^2)	(GPa)				
コンクリート	23	30	0.2			
鋼	7.85	200	0.3			
はお封脂	1.2	1.5	0.34			

入力波形は φ 12.5mm の鋼球による打撃を想定し,接 触時間 60µs のパルス波とした。波形の入力・出力位置に ついては,アンカーボルトのあるモデルでは鋼板上で入 力してボルト頭部出力を行い(以降,"(a)鋼板打撃/ボル ト受信"と表記),アンカーボルトのないモデルでは鋼板 上で入力し鋼板上で出力した(以降,"(b)鋼板打撃/鋼板 受信"と表記(図-21 参照))。出力は加速度波形とし, 出力時間間隔 1µs,および出力点数 10,000 点とした。

打撃に伴う表面波の影響を排除するため、0µs から 75µs までをカットした時刻歴波形に対して、高速フーリ エ変換を適用し周波数分析を行った。図-22 にピーク周 波数を記した受信波のスペクトルのイメージ図を、図-23 にスペクトル上で明らかなピークを示した周波数を 示す。ひび割れ深さ 40mm~100mm の範囲(下側鉄筋位 置はおおむね 45mm)において、ひび割れ深さが小さく なるほどピーク周波数が大きくなることがわかった。上 記のことから、床版の下側鉄筋付近に水平ひび割れがあ る場合、水平ひび割れがない健全部に比べて、ピーク周 波数は大きくなる傾向にあると考えられる。このことは、 ひび割れ深さ 40mm~100mm のピーク周波数と図-23 中に示した健全部の床版厚さと同等となるひび割れ深さ 200mm のピーク周波数と比較すればわかる。この解析結 果を踏まえて、現地調査を行った結果を以下に記す。

床版下面からの測定は、床版上面からの調査後に実施 しており、上面側での損傷の有無があらかじめわかって





(a) 鋼板打撃/ボルト受信
(b) 鋼板打撃/鋼板受信
図-21 波形の入力・出力位置(モデル中央部拡大)





いる状況で行った。本調査を行った各径間の走行車線側 は、第一径間では比較的健全であり、第二径間には損傷 が多いと推定されていた。そのため、本研究では、第一 径間に対しては健全箇所を、一方、第二径間に対しては、 損傷想定箇所を対象とすることとした。これに従って、 健全箇所から3箇所、損傷想定箇所から2箇所(調査箇 所は図-8 および図-9 中の赤丸部に位置する)につい て測定を行った結果を図-24に示す。各測定において20 回の打撃を行ったが、データにばらつきがあったため、 相互相関により10回分のデータを抽出し、それぞれ全 健全箇所60回分および全損傷想定箇所20回分の平均値 を算出した。 図-24 からわかるように、鋼球径を変化させても、健 全箇所と比較して、水平ひび割れがある場合ではピーク 周波数が大きくなる傾向を示した。特に、 φ12.5mmの鋼 球での結果においてその傾向が顕著であり、これは、こ の直径の鋼球により入力される弾性波の波長が床版下面 と水平ひび割れとの間で発生する多重反射を励起するの に適した条件であるためと考えられる。



6. 上面および下面からの測定結果のまとめ

これまでに示した,床版上面および下面からの測定に よって得られた結果について,特筆すべきポイントをま とめると以下のようになる。

- (1) 衝撃弾性波法を使用した RC 床版上面からの調査に おいて,削孔調査との整合性は比較的良好であった。
- (2) 本研究で適用した方法において、水平ひび割れの深 さを概ね適切に把握できることがわかった。
- (3) また、本調査により、特に第二径間において、大型 車両の走行台数が多くなる走行車線側に損傷が集 中していることが分かった。
- (4) さらに、本調査の結果、対象とした床版内部では、 床版下段鉄筋位置の近傍に、水平ひび割れが発生し ていることが確認できた。
- (5) 鋼板接着した RC 床版下面(鋼板表面)からの調査 においても,弾性波の入力方法と受信波における評 価指標を工夫することにより,床版内部の損傷の状 況を推定することができる可能性を見出すことが できた。
- 7. 上下面両面からの評価に基づく損傷状況の推定方法 本調査において,床版上面および下面から衝撃弾性波

法による測定を実施したが、今回は、本橋の床版におけ る水平ひび割れの発生が下段鉄筋位置にのみに集中して いたことから、床版上面からの調査だけでも、それを把 握することができた。しかしながら、調査対象が異なれ ば、決して本橋と同様な条件にあるとは限らない。した がって先述のように、上下段の両方の鉄筋位置に水平ひ び割れが発生している場合には、床版上面からの非破壊 調査だけでは不十分と言える。

本調査において,実施した鋼板を介しての衝撃弾性波 法による調査について,水平ひび割れの有無を確認する ことができる可能性は示唆できたが,その深さまでを把 握することは難しい。

一方で、床版上下面両面からの調査結果を総合的に判 断すれば、以下に記すような考え方に基づいて、床版内 部の損傷状況を推定することが可能になると考える。

- (1) 水平ひび割れは, RC 床版内の上下段鉄筋位置のどちらかまたは両側に発生している可能性がある。よって, 衝撃弾性波法を適用する場合は, RC 床版の上下面の両方から実施することが望ましい。
- (2) RC 床版上面からの調査において,上段鉄筋位置に 水平ひび割れがあり,下面から調査で損傷がないと 判定されれば,上段鉄筋位置に水平ひび割れが発生 している可能性が高いと判断することができる。
- (3) 一方,上記(2)とは逆の判定結果になれば、下段鉄筋 位置に水平ひび割れがある可能性が高いと判断す ることができる。
- (4) 上記に従い上・下面からの調査結果を併用すること より、床版内部の水平ひび割れが一層であるか、あ るいは二層であるかの判断することができる。

謝辞

本論文を取りまとめるあたり,ご協力いただいた神戸 市みなと総局技術部工務課の藤井氏,長澤氏,大阪大学 の寺澤助教,服部研究員に心より謝意を表します。

参考文献

- 1) 鎌田敏郎,松井繁之,金裕哲,久保司郎,阪上隆英, 塩谷智基,田川哲哉,崎野良比呂,廣畑幹人,内田 慎哉,大西弘志:各種道路橋床版における疲労損傷 の非破壊検査システムに関する研究開発,国土交通 省新道路技術会議「道路政策の質の向上に資する技 術研究開発」成果報告レポート,No.19-3,2010.6
- 2) 内田慎哉,鎌田敏郎,山本健太,前裕史,大西弘志: 弾性波の入力方法が道路橋 RC 床版における水平ひ び割れの評価に与える影響,コンクリート構造物の 補修,補強,アップグレード論文報告集, Vol.9, pp.31-38, 2009.10