

報告

鋼板接着補強された既設 RC 床版の衝撃弾性波法による 水平ひび割れ検出に関する非破壊調査

葉 栗*, 鈴木 真*, 山下健太郎*, 水野哲也**, 寺澤広基*, 鎌田敏郎*

*大阪大学大学院, 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

**神戸市港湾局海, 岸防防災課 (〒650-0045 神戸市中央区港島 4-1-9)

コンクリートの内部欠陥を検出する非破壊検査法の一つに衝撃弾性波法がある。鋼板接着補強された RC 床版に対し、床版下面から鋼板を介してコンクリート部材内に弾性波を入力した場合、出力された波形は理論値に対して大きく相異なる。筆者らは、1/3 オクターブバンド周波数解析を適用し、出力された波形を処理することにより、鋼板の接着状態に関わらず、床版内に発生した水平ひび割れの有無を検出することができる評価方法の検討を行った。

キーワード: RC 床版, 鋼板接着工法, 水平ひび割れ, 衝撃弾性波法

1. はじめに

既設 RC 床版の補強工法の一つに鋼板接着工法がある。本補強工法は、床版の下面にアンカーボルトを用いて鋼板を固定し、床版と鋼板との間にエポキシ樹脂を注入することにより、床版と鋼板との一体化を図り、既設 RC 床版のせん断抵抗性および疲労耐久性を向上させるものである。しかし、本補強工法が施されたにも関わらず、疲労等の要因により床版内部の損傷（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、床版下面からの外観目視では床版内部の状況の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、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、未だ確立されておらず、エポキシ樹脂が適切に充填されていない箇所ではさらに検出が困難となる。

本研究では、供用下にある鋼板接着 RC 床版に対して床版下面から衝撃弾性波法による計測を実施し、計測結果に対して 1/3 オクターブバンド周波数解析を適用するとともに、床版上面からの削孔調査と照合することにより、床版内部の主たる損傷である水平ひび割れを検出する計測方法について検討を行った。

2. 対象とした橋梁

本研究では、図-1 に現況を示す兵庫県神戸市内の主要幹線道路に位置する A 橋（連続鋼鈹桁橋）における床

版を対象とした。本橋では、図-2 に示すように、平成 11 年に鋼板接着補強が施されており、その後、詳細点検の結果より、床版内部の損傷の進行が懸念されたため、非破壊試験を実施した。

現地計測は、本橋の PA~PB 径間において実施した。当径間は、支間長 $L=30.100\text{m}$ 、幅員 $w=27.500\text{m}\sim 27.792\text{m}$ であり、11 主桁から構成される鋼鈹桁橋である。床版厚は $t=190\text{mm}$ であり、コンクリートの設計基準強度は $f_{ck}=24\text{ N/mm}^2$ である。補強鋼板の厚みは $t=4.5\text{mm}$ であり、床版下面との接触面にエポキシ樹脂が注入されている。



図-1 A 橋の現況



図-2 鋼板接着の状況（床版下面）

また、橋軸方向に 1m 間隔でアンカーボルトが設置されている。

3. 衝撃弾性波法の計測概要

3.1 削孔調査

削孔調査は、床版上面から夜間における交通規制下で実施した。削孔箇所数は、10 箇所とした。計測点の配置および削孔位置を図-3 に示す。削孔径は $\phi 50\text{mm}$ とし、配筋図および現地での電磁波レーダによる鉄筋探索の結果に基づき、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。

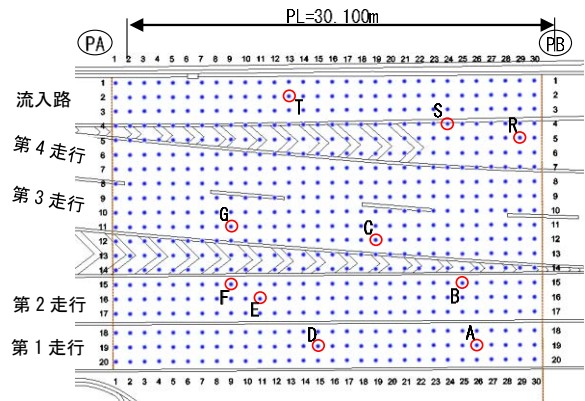


図-3 削孔位置

3.2 床版下面からの計測方法

床版下面からの計測は、対象橋梁の路下道路の夜間交通規制内で高所作業車を使用して実施した。路下道路の交通規制が可能となる範囲が限定されていたため、第 3 車線から第 4 車線を中心に計測を行った。計測状況を図-4 に示す。

計測を行う前にテストハンマによる打音調査を行い、計測点近傍での鋼板接着の有無を確認しマーキングを行った。弾性波の入力は、鋼球を溶接した鋼棒による打撃によって行った。打撃に使用した鋼球は、 $\phi 5.9\text{mm}$ 、 $\phi 9.5\text{mm}$ 、 $\phi 12.5\text{mm}$ 、 $\phi 15.9\text{mm}$ および $\phi 19.6\text{mm}$ の 5 種類とし、受信には、3Hz~30kHz においてフラットな応答感度を持つ加速度計を使用し、鋼板が接着している計測点では鋼板表面、鋼板が剥離している計測点ではアンカーボルト頭部に加速度計を設置し、鋼板を打撃して計測を行った。本計測では、10 回の打撃を行った結果から、相互相関により各点におけるデータを抽出し、得られた受信波形に対して FFT を行って周波数スペクトルを算出した。その際に、鋼板自体の振動を除去するために、ハイパスフィルタにて 60kHz 以下の低周波成分を除去した。



(a) 鋼板接着の場合 (b) 鋼板剥離の場合

図-4 計測状況

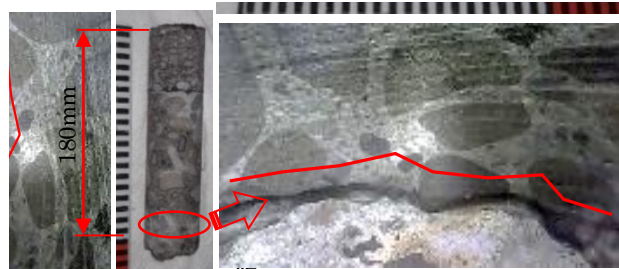


図-5 削孔調査結果の一例 (No.B)

4. 計測結果

4.1 削孔調査の結果

削孔調査の結果、6 箇所において水平ひび割れが発生していることを、また 4 箇所において水平ひび割れが発生していないことを確認した。調査結果の一例として、水平ひび割れが確認された測点 B において採取したコンクリートコアを図-5 に示す。水平ひび割れを確認した 6 箇所とも、下段鉄筋位置近傍に発生していた。

4.2 床版下面からの計測結果

調査範囲、打音調査による鋼板の接着の有無および削孔調査の結果を図-6 に示す。健全および水平ひび割れが発生している範囲において、鋼板が剥離している箇所

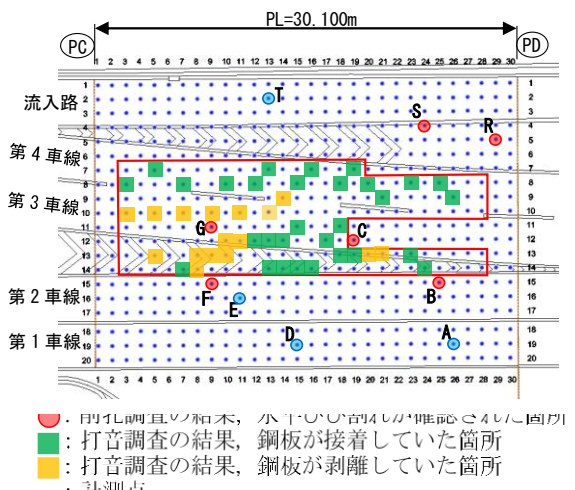


図-6 削孔箇所および調査結果

を確認した。計測点は全 47 点とし、全計測点のうち 32 点 (68%) において鋼板が接着していたが、15 点 (32%) において剥離していた。鋼板が剥離している範囲は、鋼

内部損
水平ひ
CTM卓越

板接着箇所および鋼板剥離箇所において、計測を行った計測点を図-7に、得られた受信波形に対してFFTを行った結果の一例を、それぞれ図-8および図-9に示す。図-8には、比較的ピーク周波数が明瞭であったφ12.5mmで打撃を行った結果を示した。また、鋼板剥離箇所では、いずれの鋼球でもピーク周波数が明瞭ではなかつたため、図-9には一例として9.5mmにより打撃を行った結果を示した。図-8をしてみると、ピーク周波数を読み取ることができるが、全箇所において水平ひび割れの有無を特定できる結果は得られなかつた。これに対し図-9をしてみると、波形はブロードになり明瞭なピーク周波数を示していないことが分かる。これに対して、筆者らは1/3オクターブバンド周波数分析を適用することにより、水平ひび割れの有無を判定することを試みた。

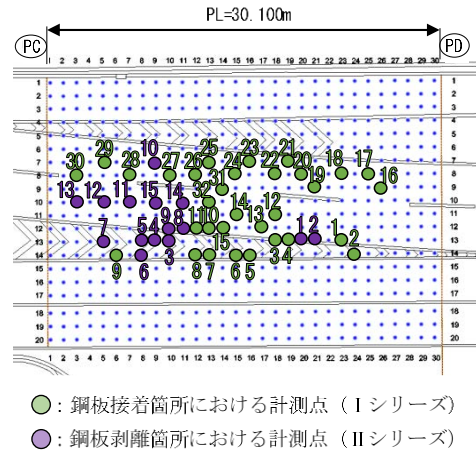


図-7 計測点の位置

5. 1/3オクターブバンド周波数解析

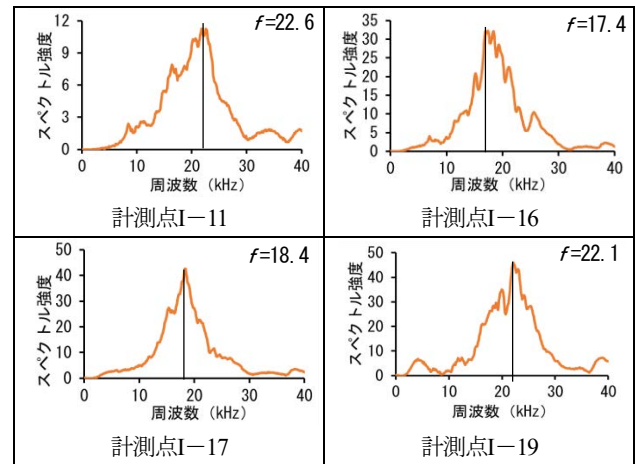
5.1 解析概要

既往の研究では、衝撃弾性波法による鋼板接着した床版下面からの水平ひび割れ検出において、鋼板とコンクリート面の付着が良好で、さらに計測面（鋼板）と水平ひび割れ、あるいは、計測面と床版上面との間で弾性波の多重反射による共振周波数が存在することを前提として、これに起因する単一の周波数の共振システムを高精度に検知するための検討を行ってきた¹⁾。一方で、実際の構造物の計測では、鋼球で鋼板を打撃した際に発生する高調波や、鋼板とコンクリート面の剥離によって励起される鋼板の振動、鋼板表面を伝搬する表面波、水平ひび割れ位置の不陸や接触状況、さらにコンクリート特有の不均質性や微細な気泡群といった要因によって、特定の周波数のスペクトルが卓越しない場合が多くあり、高い分解能を持った解析法が必ずしも精度の高い情報をもたらすとは限らない場合がある。

本研究では、新たな解析方法として、1/3オクターブ分析を用いた周波数解析法の適用性について検討を行った。鋼板剥離や水平ひび割れといった損傷あるいは、その程度によって、広帯域の応答振動が励起されると仮定した場合、単一の周波数の共振システムを見つけるといよりも、発生する信号の周波数帯域の変化に着目する方が合理的である場合がある。既往の研究では、打音法の解析において、一見粗い定比幅分析（バンドパス分析）の方が有益な情報を得られる可能性があることも報告²⁾されている。

5.2 解析方法

本研究で用いた1/3オクターブバンド周波数分析は、本来、騒音や振動の評価に広く用いられるものであり、周波数間隔は等比間隔となり、中心周波数とバンド幅が比例関係となる点で、FFTのような狭帯域分析法とは異なる。解析は、基準周波数を100Hzとして中心周波数を



※ 図中の f はピーク周波数を示す。

図-8 計測結果の一例（鋼板接着，φ12.5mm）

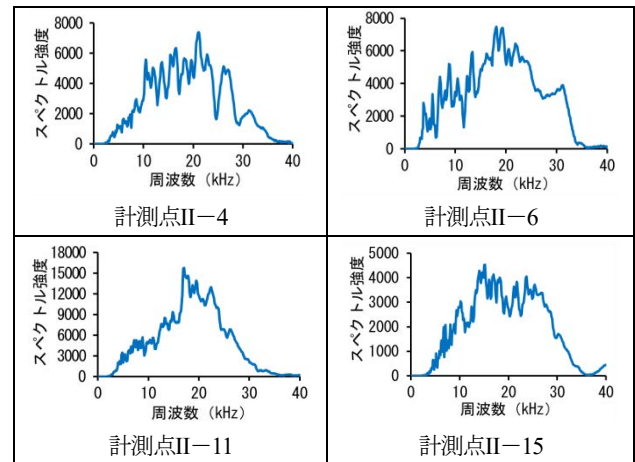
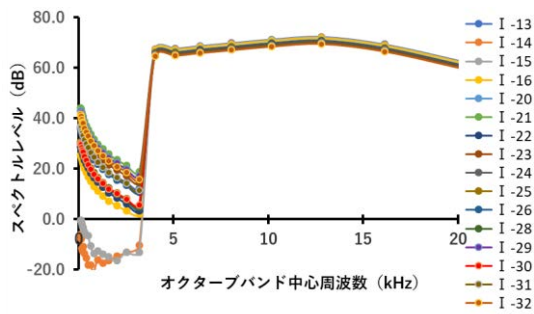


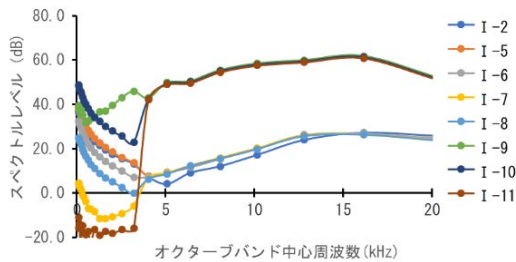
図-9 計測結果の一例（鋼板剥離，φ9.5mm）

を設定し、それぞれ、バンドパスフィルタを通過するスペクトルのパワーを求めた。なお、式(1)に示すように、バンド幅は中心周波数によって変化するため、単位周波数当たりの密度としてパワーの基準化を行った。

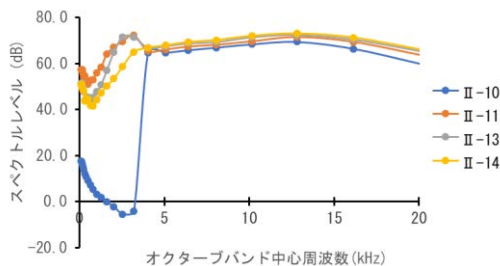
$$B = (f_1 - f_2) \approx 0.23 f_m \quad (1)$$



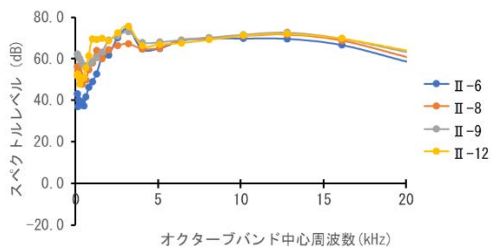
(a) 鋼板接着 (健全) (鋼球 φ 12.5mm)



(b) 鋼板接着 (水平ひび割れあり) (鋼球 φ 12.5mm)



(c) 鋼板剥離 (健全) (鋼球 φ 12.5mm)



(d) 鋼板剥離 (水平ひび割れあり) (鋼球 φ 12.5mm)

図-10 解析結果

ここで、 f_1 : 1/3 オクターブ上限周波数、 f_2 : 1/3 オクターブ下限周波数、 f_m : 中心周波数 B : バンド幅

5.3 解析結果

過去に行った衝撃弾性波法による床版上面からの調査³⁾において、鋼板接着箇所および鋼板剥離箇所別に、水平ひび割れがあると推定された箇所、健全と判断された箇所近傍において計測した波形に対し、1/3 オクターブバンド周波数解析を行った結果を図-10に示す。図の横軸は1/3 オクターブ中心周波数を示し、縦軸はスペクトル強度を常用対数表記したものである。このため、応答強度が著しく低い場合は縦軸が負の値となる場合がある。

鋼板接着—健全箇所 (16 計測点, 図-10(a)参照) 付近では床版厚さに相当する周波数 (10kHz) 付近での応答強度が強く、いずれの計測点でも概ね同様な周波数特性を示しているのに対し、水平ひび割れを有する箇所 (8 計測点, 図-10(b)参照) では、計測箇所ごとの差異や、全体的なレベルの低下が見うけられる。鋼板剥離箇所 (健全箇所: 4 計測点, ひび割れ箇所: 4 計測点, 図-10(c)および(d)参照) では、鋼板接着箇所と比較して低い周波数帯域での応答強度が高く、鋼板の振動成分が卓越していることが伺えるが、水平ひび割れ有無による顕著な違いは見受けられず、鋼板剥離箇所直下のコンクリートの情報を捉えられていないと考えられる。

これらの結果から、低い周波数帯域の応答強度から鋼板接着および剥離の区別が可能であるのに加え、鋼板接着箇所では、高い周波数帯域での応答強度の分布に差が有ることから、鋼板接着箇所における床版内部の水平ひび割れの有無や状態を推察できる可能性が示された。

6. まとめ

既設の合成床版内の水平ひび割れを衝撃弾性波法で計測する際、計測波形には予期しない外乱が含まれる可能性が高く、従来のように単一の線スペクトルを高精度に捉えようとする方法では評価を難しくする場合がある。実計測波形の解析の結果から、1/3 オクターブバンド周波数解析のような帯域のスペクトルを相対的に評価する方法の適用可能性も示された。また、これまで技術者が判定を行っていた鋼板剥離箇所については、これを客観的に評価できる可能性が示されたため、事前に計測波形を振り分けて、適切な解析を実施するなど、解析精度の向上に寄与できるものとする。

本橋では、水平ひび割れが下段鉄筋位置にのみ発生していた。当該ひび割れは、上段鉄筋位置または両位置に発生する可能性もある。このような多様な損傷形態に応じた適用性の検証が今後の課題となる。

参考文献

- 1) 藤原理絵, 鈴木真, 寺澤広基, 鎌田敏郎: 衝撃弾性波法を用いた鋼板接着補強 RC 床版における水平ひび割れ評価に関する研究, 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.18, pp.237-242, 2018.10
- 2) 山下健太郎ほか: 打音信号の解析に関する考察 (一社) 日本非破壊検査協会, 第 5 回コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム, Vol5, pp35-38, 2015.8
- 3) 一色智彦, 鈴木真, 藤原理絵, 鎌田敏郎: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No.2, pp.1309-1314, 2018.7