

## 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の開発

鎌田敏郎\* 阪上隆英\*\* 玉越隆史\*\*\*

## 1. はじめに

我が国の社会資本は、これまでに蓄積されてきたストックのうち高齢化したものの割合が今後急速に増加するという課題に直面することから、これからは、施設の状態を定期的に点検・診断し、異常が認められる際には致命的欠陥が発現する前に速やかに対策を講じ、ライフサイクルコストの縮減を図る「予防保全」の考えに立った戦略的な維持管理・更新を実施していく（平成21年3月31日閣議決定）とされている。その実現には、第一に既設橋の機能あるいは性能の状態を正確に把握し、それらを含むデータに基づく科学的な維持管理への移行が必要である。

道路橋の床版は、交通荷重の影響を直接受ける苛酷な条件のなかで損傷を生じやすく、交通の安全確保には損傷やその兆候をできるだけ早期に検知して適切な対処を行うことが重要である。しかし、舗装や塗装の存在から、RC床版、鋼床版ともに、ひび割れなどの床版本体の異常を早い段階に目視で検出することが困難な場合が多く、有効かつ効率的な点検手法の開発が急務となっている。直轄道路橋の定期点検でRC床版の疲労損傷及び鋼床版のき裂の発生が確認された橋梁数割合を見ると、RC床版の疲労損傷は現状でも1割を超え深刻な実態が明らかであった。一方、鋼床版のき裂は2%とその率はわずかであったものの、近年重交通路線での損傷報告が増加しつつあり、橋梁全体の高齢化に伴って今後急増することも懸念される。

これらの背景を踏まえ、本研究では、目視による検出が困難な床版の損傷の異常検知を主目的に、RC床版では床版内部で発生する水平ひび割れを、鋼床版では対象箇所が膨大で塗装の存在から直接視認が困難な場合も多い溶接部の疲労き裂を効率的に検出する非破壊検査システムの開発を行った。

なお、本研究は、国土交通省道路局に設置された「新道路技術会議」（委員長 中村英夫 東京都市大学

学長、東京大学名誉教授）の研究公募制度に採択され、実施したものである。

## 2. 衝撃弾性波法に基づくRC床版内部に生じる水平ひび割れの検出

## 2.1 衝撃弾性波法

道路橋RC床版内部の水平ひび割れは、疲労が蓄積されることにより、既設コンクリート内部の鉄筋位置において（図-1参照）、又は既設コンクリートと補強された上面増厚コンクリートとの界面において発生する2種類に大別される。このような水平ひび割れの発生や進展は、床版の下面又は上面である舗装面からの外観目視では判断することが極めて困難であるため、非破壊により水平ひび割れを評価する手法の確立が望まれている。

本研究では、まず、一般的な道路橋RC床版の厚さを想定したコンクリート版供試体を作製し、衝撃弾性波法、Electro Magnetic Hammer Method及び超音波法の3つの異なる弾性波法により水平ひび割れを模擬した人工欠陥の検出を試みた。各手法の特徴及び適用可能な人工欠陥の大きさや深さに関する考察に基づき、検出できる守備範囲が広い手法として、衝撃弾性波法を選定した。

衝撃弾性波法によりRC床版内部の水平ひび割れを検出する原理を示した概念図を、図-2に示す。この手法では、鋼球を用いて床版の表面を打撃する（床版防水工が無ければ、舗装上からでも可）ことにより床版内部に弾性波を伝播させ、床版表面と底面で生じる多重反射、あるいは床版表面と水平ひび割れの間で多重反射する波を、表面に設置したセンサにより受信し、この受信波を周波数分析すること

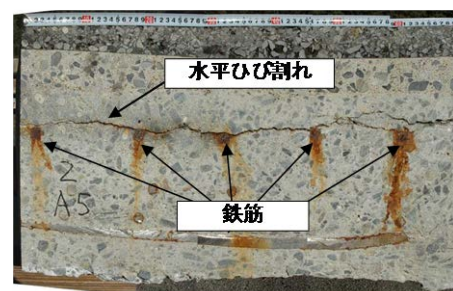


図-1 RC床版内部の鉄筋位置での水平ひび割れの発生状況

により算出されるピーク周波数（図-2中の $f_T$ ：版厚共振周波数及び $f_d$ ：欠陥共振周波数）に基づき、床版の版厚： $T$ や水平ひび割れまでの深さ： $d$ を推定する。衝撃弾性波法の計測状況を図-3に示す。

2.2 道路橋から切出したRC床版に対する適用性

供用中の道路橋から切り出したRC床版を対象として、水平ひび割れの検出を試みた。事前に3次元衝撃応答解析により、弾性波の入力方法、受診方法及び周波数解析方法の最適な組合せを決定した。入力する弾性波の周波数は、最も浅い位置にある欠陥共振周波数以上とする必要がある。入力周波数は、鋼球の直径による（直径が小さいほど高い周波数となる一方、衝撃力は小さくなる。）。入力周波数と衝撃力の最適バランスを解析から見出し、弾性波の入力は鋼球直径6.4mmとし、弾性波の受振には加速度センサを用いた。センサで受信した信号は、サンプリング時間1 $\mu$ s、サンプリング数10,000点の時刻歴応答波形として波形収集装置に記録し、記録した波形に対して周波数分析を行い、周波数スペクトルを算出した。

特徴的な周波数スペクトルが得られた計測箇所の結果の一例を図-4に示す。図中には床版厚に対応する $f_T$ 及び計測された $f_d$ を矢印で示している。

計測箇所A7では、周波数スペクトル上のピークと $f_T$ （版厚共振周波数）が概ね一致していることから、水平ひび割れが発生していないものと推察される。これに対して、計測箇所A5及びA9では、 $f_T$ （版厚共振周波数）よりも高い周波数領域に単独の

ピークが出現している。周波数スペクトル上でのピークの周波数の値から、床版底面から計測箇所A5で約125mm、計測箇所A9で約167mmの位置に弾性波の反射源、すなわち水平ひび割れが発生している可能性がある」と推定できる。

計測による推定結果を検証するため、床版を削孔して孔内に棒状スキャナを挿入し、内部のひび割れの発生状況を撮影した（図-4参照）。計測箇所A5では床版下面から120mm付近に、計測箇所A9では床版下面から160mm付近に、水平ひび割れが発生していた。一方、計測箇所A7では、水平ひび割れは発生していなかった。以上のように、衝撃弾性波法による推定結果は、実損傷位置とよく一致していた。

2.3 まとめ

既設橋のRC床版の材料や構造は適用基準などから容易に推定でき、床版厚さは現地でも容易に確認できる。本研究では、このような特徴を踏まえ、3次元衝撃応答解析の援用により計測対象に適合した条件設定を適切に行うことで、従来は精度や効率の面で課題が多いとされてきた衝撃弾性波法を応用して、舗装上からでも簡便かつ確実に床版内部の水平ひび割れを検出できる非破壊検査システムを確立した。床版の水平ひび割れは深刻化すると面的な拵がりをもつことから、検査位置を計画的に配置して順次実施することで、供用性への影響を抑えつつ高い確率でその有無を検出できる可能性がある。また、疑わしい箇所では、その箇所のみ舗装を小規模に削孔して床版表面を露出させて精度の高い検査を行う

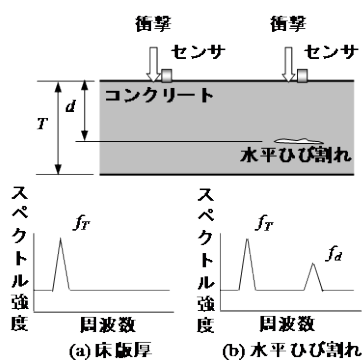


図-2 衝撃弾性波法による水平ひび割れの検出原理



図-3 衝撃弾性波法による計測状況

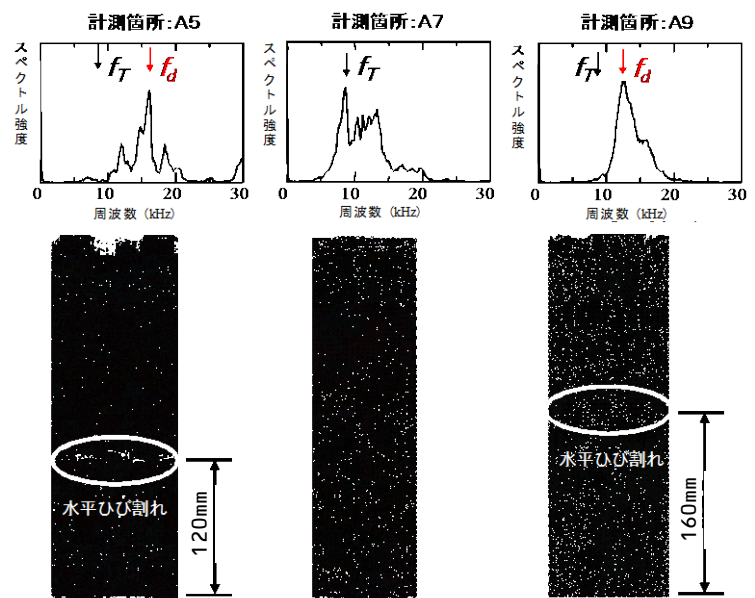


図-4 計測周波数スペクトルとスキャナにより把握した水平ひび割れの発生状況

ことも可能である。

### 3. 赤外線サーモグラフィによる鋼床版の疲労き裂の遠隔検出手法

#### 3.1 自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法

道路橋における鋼床版では、疲労き裂の検査対象となる溶接部の数が膨大であること、き裂の幅が小さく徹底した近接目視が必要となること、塗装があるためき裂そのものが視認できない場合があることなどから、効率的で確実なき裂検出手法の開発が急務である。これらを踏まえて本研究では、ロックイン赤外線サーモグラフィ法による道路橋鋼床版のき裂検出手法の開発を行った。

き裂のある鋼床版上を大型車が通過すると、き裂先端付近に顕著な応力集中が生じ、熱弾性温度変動が周辺部に比べて局所的に大きくなる（引張状態で温度降下、圧縮状態で温度上昇）。この特徴的な温度変動分布を赤外線サーモグラフィにより計測し、可視化することにより、き裂の検出を行うものである。しかしながら、温度変動は赤外線計測ノイズと同程度の微小なものであるため、赤外線計測データと応力変動に関する参照信号とのロックイン相関処理を行うことにより、ノイズを除去する必要がある。従来のロックイン処理においては、応力変動に関する参照信号を被測定物に取り付けたひずみゲージなどから外部入力していた。これに対し、赤外線計測画像内の一部領域の温度変動データを参照信号とし、すべての領域の温度変動データとロックイン相関処理を行うことで、外部からの参照信号を用いることなく、走行車両によるランダムな輪荷重負荷の下での相対応力分布を高精度に求める方法を開発した。これが、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ



図-5 赤外線サーモグラフィによる計測状況  
(左：近接、右：遠隔)

法<sup>\*</sup>である。

この方法の特徴として、橋梁上を走行する大型車等の輪荷重による応力変動を赤外線サーモグラフィを用いて検出することから、特別な荷重負荷が不要であること、遠隔から非接触で全視野測定ができること、赤外線感知の原理から道路橋で一般的な塗膜であれば剥がす必要がないこと、あまり深部でないなど条件によっては表面に開口していない鋼材内部で進行するき裂も検出できることが挙げられる。

#### 3.2 実橋鋼床版のビード貫通型疲労き裂の検出

供用中の実橋梁において、床版上を走行する車輛から受ける実働輪荷重による熱弾性温度変動をもとに、鋼床版のビード貫通型疲労き裂を検出する実験を行い、き裂検出性に及ぼす諸因子の影響を検討した。図-5に計測状況を示す。計測は、近接に加え、遠隔からも行っている。

自己相関処理結果及び赤外線強度変動波形の代表例を、図-6に示す。赤外線強度変動波形に現れた3つのピークは、荷重車の前後輪の荷重によるものである。図の(a)及び(b)の自己相関処理画像においては、き裂先端の応力集中部が同程度に鮮明に現れている。車両の走行速度により、輪荷重による赤外線強度変動周期は変化するものの、自己相関処理による相対応力分布は変化せず、き裂検出性には影響しないことが分かる。これに対して、図の(c)では、き裂先端の応力集中部が確認し難く、走行車両がき裂から離れた位置を通るとき、き裂付近の実働応力の低下により、き裂の検出性が低下することが示された。

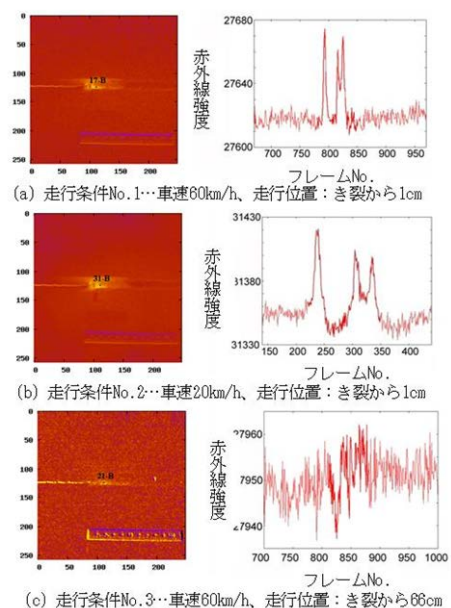


図-6 自己相関ロックイン測定結果及び赤外線強度変動波形

\*土木用語解説：自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法



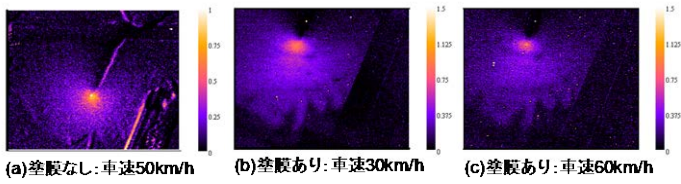


図-7 塗膜の有無による自己相関ロックイン測定結果

塗膜の有無による影響の代表例を、図-7に示す。塗装はフッ素樹脂であり、膜厚は $250\mu\text{m}$ である。図より、塗膜ありの状態においてもき裂先端付近の熱弾性温度変動の局所的増大が鮮明に検出できおり、これを基にき裂検出が可能であることが分かった。

### 3.3 デッキ貫通型疲労き裂の検出

実橋梁で問題となっている疲労き裂には、溶接ビード貫通き裂の他に、図-8に示すようなデッキ貫通き裂がある。デッキ貫通き裂は、ビード貫通き裂と異なり、検査可能な表面にき裂が開いていないため、目視点検ではその検出が困難である。

このようなデッキ貫通き裂に対する自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法の適用性を検証するため、鋼床版を模した試験体を用いた繰り返し载荷疲労試験を行い、き裂検出を試みた。

無塗装試験体における载荷回数毎のロックイン処理結果を図-8に示す。図に示したロックイン画像から、繰り返し载荷53万回の時点で、溶接部上において相対応力分布の変化が検出された。さらに载荷回数の増加に伴い、応力集中部の位置はき裂の進展方向（半楕円き裂長手方向）に移動した。

### 3.4 まとめ

自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法により、塗装を除去しないで遠隔から鋼床版の溶接部の疲労き裂を効率的に検出できることが実証された。また、表面にき裂が現れない内部き裂についても条件によっては検出可能であり、デッキ貫通型き裂の

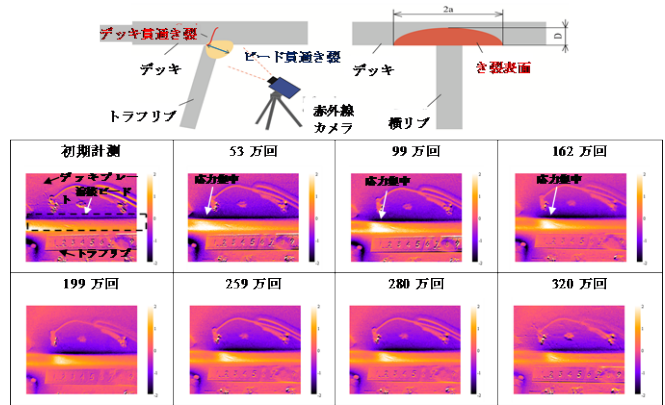


図-8 自己相関ロックイン測定結果及び赤外線強度変動波形

簡便な非接触のき裂検出手法として実用化できる可能性が高いことが実証された。

## 4. おわりに

本研究では、これまでの目視主体の点検では早期に検知することが困難であった床版の疲労損傷に対して、検査対象の特徴と適用技術の特徴をうまく組み合わせることで、実務のニーズに適合した効率的で信頼性のある点検手法の開発を目指した。その結果、供用下の道路橋のRC床版内部の水平ひび割れ、鋼床版の疲労き裂に対して実用的な検査手法を確立することができた。

今後は、検査手法としての適用限界や信頼性に関してさらに検討を行うとともに、実務で適切に運用できるためのマニュアル等の整備を行っていきたいと考えている。

### 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、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

鎌田敏郎\*



大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻教授、工博  
Dr. Toshiro KAMADA

阪上隆英\*\*



神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻教授、工博  
Dr. Takahide SAKAGAMI

玉越隆史\*\*\*



国土交通省国土技術政策総合研究所道路研究部道路構造物管理研究室長  
Takashi TAMAKOSHI