

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究状況報告書（2年目の研究課題対象）】

① 研究代表者	氏名（ふりがな）		所属		役職	
	鎌田 敏郎（かまだ としろう）		大阪大学		教授	
② 研究テーマ	名称	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				
	政策領域	[主領域] 道路資産の保全	公募	タイプII		
	[副領域]	タイプ				
③ 研究経費（単位：万円） ※H19、20は委託金額、H21は計画額を記入。端数切り捨て。	平成19年度	平成20年度	平成21年度	総合計		
	1,995	2,400	5,000	9,395		
④ 研究者氏名（研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入して下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加して下さい。）						
氏名		所属・役職				
松井 繁之		大阪工業大学・教授				
久保 司郎		大阪大学・教授				
金 裕哲		大阪大学・教授				
阪上 隆英		大阪大学・准教授				
塩谷 智基		京都大学・准教授				
崎野 良比呂		大阪大学・助教				
大西 弘志		大阪大学・助教				
⑤ 研究の目的・目標（提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入して下さい。）						
<p>本提案課題では道路橋に使用される主な3種類の床版（鋼床版、鉄筋コンクリート（RC）床版、鋼・コンクリート合成床版）に発生する疲労損傷の中で、現場での目視確認が困難な為に大きな問題となっている損傷を対象とし、高精度で検査効率の高い非破壊検査システムを構築することを目的とした技術の開発と実用化を目指す研究を実施する。</p> <p>本提案課題では上記の技術を確立するために以下の技術的課題の解決を目標とする。</p> <p>① 赤外線法と電場指紋照合法（FSM）を用いたモニタリング手法の確立（き裂の検出と進展速度の推定を可能にする技術の開発）（鋼床版）</p> <p>② 床版内部に発生する水平ひび割れの検査技術の開発と実用化（RC床版）</p> <p>各床版に共通する問題として存在する、既存の手法では検出困難な形態の損傷 評価を実現すること。個々の床版の特質とそれに起因する損傷形態を、これらに応じた手法で評価し、結果を有機的に結合することにより、道路床版の総合的保全施策を講じるスキームを構築すること。（鋼床版、RC床版、鋼・コンクリート合成床版）</p>						

⑥これまでの研究経過 (研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入して下さい。)

(1)鋼床版の非破壊検査技術の開発

本年度は自己相関ロックインサーモグラフィによる疲労き裂検出の更なる高精度化および高効率化のため計測システムの改良を行うとともに、同手法による疲労き裂検出の確実性ならびに精度を輪荷重試験ならびに実橋鋼床版の計測を通じて実験的に確認した。

(1-1)自己相関ロックインサーモグラフィの高精度化および高効率化

赤外線カメラからの時系列赤外線画像データに関する信号を処理する自己相関ロックイン処理プログラムを改良し、計測の高速化を実現した。現場計測では、赤外線カメラ1台あたり、①撮影領域の設定とフォーカス調整などに1分、②橋上を車両が走行している状態でのデータ取得に1分、③データ確認および保存に1分、④自己相関ロックイン処理に1分、合計4分で計測を完了させることができた。

さらに、実橋梁の計測において、橋梁の振動による計測視野のずれを画像相関によりサブピクセル精度で補正できる、2次元パラボラフィッティング法を開発・適用することにより、自己相関ロックイン法によるき裂検出精度を向上させた。

(1-2)輪荷重試験における疲労き裂検出結果

今年度の輪荷重走行試験では、デッキプレートとトラフリブの溶接溶け込み量を75% (昨年度は25%)とした試験体を用いて、検査面に対してより深部からデッキ貫通疲労き裂が発生・進展する場合におけるき裂検出性能を確認した。計測結果を図1に示す。図1からわかるように、載荷回数の増加に伴い、赤外線計測結果に応力集中部が明瞭に現れるとともに、その位置が移動していることがわかる。この結果から、デッキ貫通疲労き裂がより深部から発生・進展する場合にも十分な感度でき裂検出を行うことが可能であることが明らかになった。

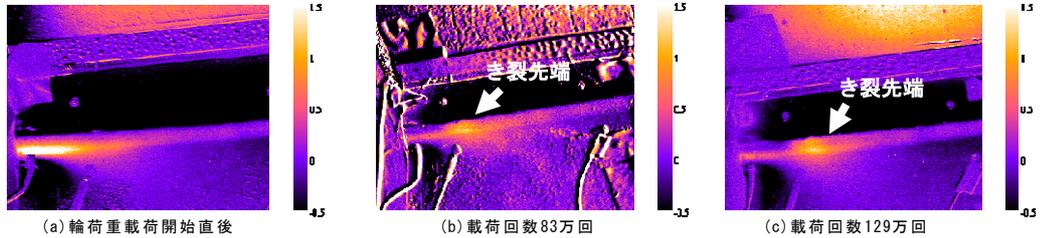


図1 輪荷重走行試験におけるデッキ貫通き裂の検出結果

また、この研究においては自己相関ロックインサーモグラフィ以外のき裂検出技術である電場指紋照合法 (FSM) の検査効率と検出精度の向上を目標とした試験計測を行った。今回の検討ではFSMにおいて取得できる情報の性質に大きな影響を与えるセンシングピンの配置に関して、全体的な監視を目的とした配置と疲労き裂発生時に状況を詳細に把握する配置の組み合わせによる効率・精度向上を狙ったセンシングピン配置を採用し、その有効性について検討している。

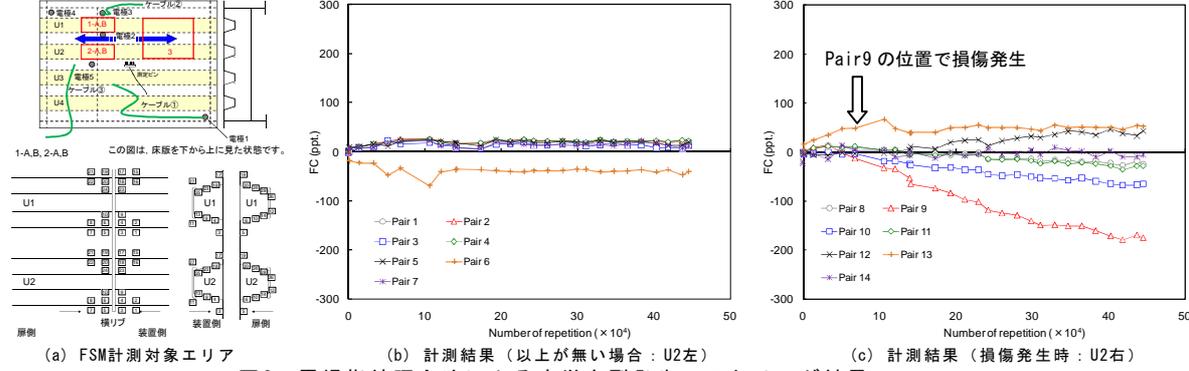


図2 電場指紋照合法による疲労き裂発生モニタリング結果

(1-3)実橋鋼床版における疲労き裂検出結果

阪堺大橋 (大阪府) において、疲労き裂検出を行った。この測定では、これまでとは異なり、①防食塗装下にある疲労き裂の検出、②反射防止のつや消し黒色塗料を用いない計測、③地上からの遠隔計測、という現場計測条件の下での自己相関ロックインサーモグラフィによる疲労き裂検出性能を検証した。

対象とした疲労き裂は、デッキプレートとトラフリブ間の溶接ビード貫通型き裂である。計測結果を図3に示す。なお、本測定結果は現場計測結果であるため、測定時に橋上を走行する車両が異なるため、直接の比較はできないが、複数回の計測結果を総合することにより、測定結果の妥当性を確認している。図からわかるように、地上に望遠レンズ付の赤外線カメラを据えて遠隔から測定した場合においても、近距離計測と同様の精度で疲労き裂検出が可能であることが明らかとなった。さらに、疲労き裂が防食塗装膜下に存在し、反射防止用つや消し黒色塗料を用いない場合においても疲労き裂検出が可能であることが明らかとなった。本手法の実用化を検討する上で、有用な計測結果であると考えられる。



写真1 現場実測状況

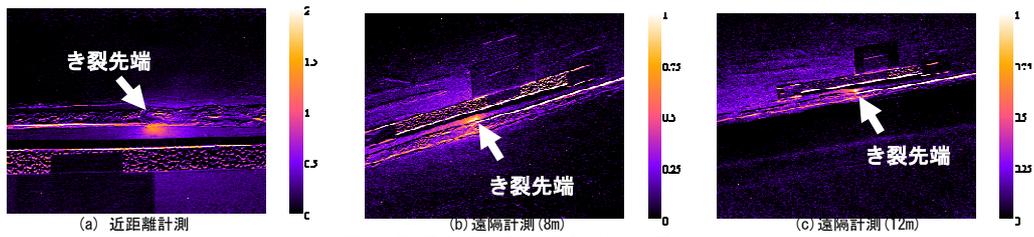


図3 阪堺大橋における計測の結果

(2)RC床版の非破壊検査技術の開発

(2-1)RC床版水平ひび割れ非破壊検査システム検討試験

以下に示す3項目についての検討を行った。検討概要および進捗を以下に示す。

①アスファルト舗装面からの衝撃弾性波法による水平ひび割れ評価手法

アスファルト舗装および内部に水平ひび割れを模擬した人工欠陥を埋め込んだRC床版供試体(写真1)を対象に、舗装面から衝撃弾性波法を適用し、受振された弾性波に基づいて水平ひび割れの有無を適確に検出する手法に関して検討を行った。その結果、アスファルト表面で水平ひび割れ検出に必要な弾性波を感度良く受振する上では、比較的高い領域まで平坦な応答感度を有する加速度計を適用するのが有効であり、弾性波の入力には、床版厚に相当する縦波共振周波数を検出できる範囲で直径の小さな鋼球を用いるのが効果的であることが判明した。また、欠陥深さが大きい場合に検出が難しくなる問題に対しては、欠陥を含まない健全部での周波数スペクトルとのパターン認識により欠陥の有無を識別する方法についても検討を行っている。現時点で、供試体実験の結果から、アスファルト舗装面から検出が可能な欠陥の深さと直径の範囲については表1のような見通しである。

②水平ひび割れ面の凹凸が評価結果に与える影響

水平ひび割れ面の凹凸形状を模擬したRC供試体(写真2)を作製し、凹凸による弾性波の散乱が本手法による評価結果に与える影響の程度について、実験および解析による検討を行った。その結果、想定される水平ひび割れ面の凹凸の範囲内では、凹凸面での反射が周波数分布上におけるスペクトルピークの判読に与える影響は欠陥検出に与える影響は大きくはないことが把握できた。また、凹凸面の影響が含まれている場合においても、たとえば周波数分析においてMTM等を活用することにより、欠陥検出が容易となる見通しが得られている。

③実際に供用されていた道路橋RC床版への本手法の適用の可能性

実構造物から切り出したいくつかの床版において、検討中の手法により推定した水平ひび割れの位置や深さは、切断面での目視観察の結果と良い対応を示している。今後も、本手法の実構造物での適用範囲を明確にする上で、引き続き、非破壊評価に影響を与える因子について検討を継続する予定である。



写真1 アスファルト供試体

表1 検出可能な欠陥直径と深さとの関係

直径 (mm)	深さ (mm)		
	100	130	250
50, 100	×	—	—
200, 250, 400	○	○	△

— : 欠陥未設置、○ : 検出可能、
△ : 検出可能(健全との判別は困難) × : 現状では困難



写真2 凹凸供試体

(2-2)コンクリート床版簡易非破壊検査手法検討試験

本年度は、RC床版の内部や鋼・コンクリート合成床版のコンクリート内部などの直接目視できない部位に発生する疲労損傷断面の進展過程を広く範囲にわたって探査し、可視化する目的で、弾性波トモグラフィ計測を疲労レベルに応じて実施し、目視できない内部損傷を速度構造の変化としてとらえる技術(破壊面や内部貫通亀裂が低速度タイとして可視化可能かどうか)を検討した。

これまで実施した事項として、1)人工欠陥を有するモデル床版に同手法を適用し、速度/減衰トモグラムより人工欠陥の位置や規模が推定可能かどうか、また、それらの欠陥に対して有効な励起弾性波の周波数や励起手法について検討した。2)モデル床版の疲労過程(輪荷重走行による繰返し载荷)の3段階(健全、1万回走行、2万回走行)に同手法を適用し、実際のクラック進展の可視化に有効な励起弾性波の周波数や励起方法について検討を実施した。一例として図4に超音波発信器により得られた速度トモグラムを示す。载荷回数増加により低速度帯の拡大が確認された。今後、異なる損傷レベルの実橋梁床版切出し試験体にも同手法を適用し、損傷の可視化技術としての有効性を検討する。

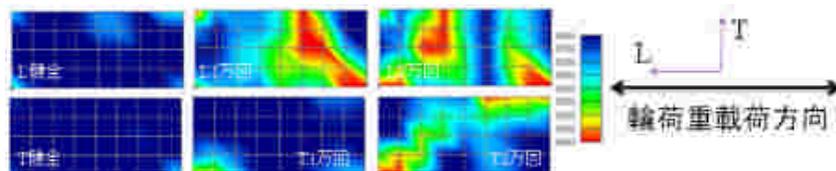


図4 試験体長手方向(L)と横断方向(T)断面の健全、1万回、2万回走行後の速度トモグラム

⑦研究成果の発表状況 (本研究の研究成果について、学術誌等に発表した論文、および国際会議、学会等における発表状況等があれば記入して下さい。)

(鋼床版関係)

- 1) 和泉遊以, 阪上隆英, 久保司郎: 赤外線サーモグラフィによる道路鋼床版の疲労き裂進展評価、日本材料学会第 57 期学術講演会講演論文集, 2008-5, pp.77-78. (日本材料学会第 57 期学術講演会, 2008.5.24-25(24))
- 2) 阪上隆英: 疲労き裂の検出技術、第 11 回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, 2008-8, pp.93-102. (第 11 回鋼構造と橋に関するシンポジウム - 鋼橋の予防保全への挑戦 - 日本の橋を守るための取り組み, 2008.8.4)
- 3) Yui Izumi, Takahide Sakagami, Shiro Kubo: Nondestructive Evaluation of Fatigue Cracks in Steel Bridges by Infrared Thermography、Proc. of 2008 International Orthotropic Bridge Conference, 2008-8, pp.502-513 (CD-ROM). (2008 International Orthotropic Bridge Conference, 2008.8.25-29, Sacramento, USA.)
- 4) 阪上隆英, 鎌田敏郎, 和泉遊以, 玉越隆史, 山田昭彦, 石尾真理, 松井繁之: 鋼床版の疲労き裂周辺の赤外線応力測定結果に基づく SFRC 舗装効果の検討、土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集, 2008-9, pp.933-934. (土木学会第 62 回年次学術講演会, 2008.9.10-12(11))
- 5) 阪上隆英, 鎌田敏郎, 和泉遊以, 玉越隆史, 石尾真理, 松井繁之: 自己相関ロックインサーモグラフィによる鋼床版の疲労き裂測定～疲労き裂検出に及ぼす影響因子の検討～、土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集, 2008-9, pp.935-936. (土木学会第 62 回年次学術講演会, 2008.9.10-12(11))
- 6) 阪上隆英, 和泉遊以, 玉越隆史, 石尾真理, 久保司郎: 自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィによるデッキ貫通疲労き裂検出、土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集, 2008-9, pp.937-938. (土木学会第 62 回年次学術講演会, 2008.9.10-12(11))
- 7) 阪上隆英, 和泉遊以, 久保司郎, 玉越隆史: 自己相関ロックインサーモグラフィによる鋼床版の疲労き裂測定、日本機械学会 M&M2008 材料力学カンファレンス講演論文集, No.08-6, 2008-9, 0185. (日本機械学会 M&M2008 材料力学カンファレンス, 2008.9.16-18(18))
- 8) 和泉遊以, 阪上隆英, 久保司郎, 玉越隆史, 石尾真理: 自己相関ロックインサーモグラフィによる鋼構造の裏面き裂検出、日本機械学会 M&M2008 材料力学カンファレンス講演論文集, No.08-6, 2008-9, 0128. (日本機械学会 M&M2008 材料力学カンファレンス, 2008.9.16-18(18))
- 9) 和泉遊以, 阪上隆英, 鎌田敏郎, 大西弘志, 久保司郎, 玉越隆史, 石尾真理: 自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィによる鋼床版デッキ貫通疲労き裂の検出、日本非破壊検査協会平成 20 年度秋季大会講演概要集, 2008-11, pp.273-274. (日本非破壊検査協会平成 20 年度秋季大会, 2008.11.5-7(7))

(RC 床版関係)

- 1) 内田慎哉, 鎌田敏郎, 藤原規雄, 玉越隆史: 道路橋鉄筋コンクリート床版の水平ひび割れの検出における弾性波法の適用、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.8, pp.27-34, 2008
- 2) 内田慎哉, 鎌田敏郎, 大西弘志, 葛目和宏, 真鍋英規, 藤原規雄, 玉越隆史: 叩けばわかる! 道路橋鉄筋コンクリート床版の疲労による水平ひび割れの検出、2009 (掲載決定)
- 3) 中山和也, 鎌田敏郎, 内田慎哉, 大西弘志: 衝撃弾性波法による道路橋 RC 床版の水平ひび割れの評価手法に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集, Vol.31, 2009 (投稿中)
- 4) 前 裕史, 鎌田敏郎, 内田慎哉, 中山和也: 周波数スペクトルのパターン認識を援用した衝撃弾性波法による道路橋 RC 床版の水平ひび割れの検出方法の改善、コンクリート工学年次論文集, Vol.31, 2009 (投稿中)
- 5) 内田慎哉, 鎌田敏郎, 前 裕史, 山本健太: 道路橋 RC 床版の水平ひび割れ面の形状が衝撃弾性波法により得られる周波数スペクトルに与える影響、コンクリート工学年次論文集, Vol.31, 2009 (投稿中)

⑧研究成果の活用方策 (本研究から得られた研究成果について、その活用方法・手段・今後の展開等を記入して下さい。)

(1) 本研究から得られた研究成果 (H20 年度)

① 鋼床版の非破壊検査技術の開発

鋼床版のデッキプレートに発生する疲労き裂の検出を目指した研究では、赤外線カメラからの時系列赤外線画像データに関する信号を処理する自己相関ロックイン処理プログラムを改良し、計測の高速化を実現した。また、輪荷重走行試験による実験的研究では、デッキプレートとトラフリップの溶接溶け込み量を 75% とした試験体を用い、検査面に対してより深部からデッキ貫通疲労き裂が発生・進展する場合におけるき裂検出性能を確認した。さらには阪堺大橋 (大阪府) において、実橋梁を対象とした計測を実施し、防食塗装により被覆された鋼床版を対象としても遠隔計測による疲労き裂検出が十分な精度で可能であることが明らかとなった。

② RC 床版の非破壊検査技術の開発

RC 床版において目視では確認が困難な、床版内部の水平ひび割れ (疲労や鉄筋腐食等に起因するもの) を対象として、この形態の損傷を適確に検出する手法として弾性波を用いる非破壊検査システムを構築中である。弾性波の減衰の著しいアスファルト面からの探査を可能とする受振方法や弾性波入力の方法、水平ひび割れの確実な検出に資する有効な波形解析方法に関して成果が得られている。また、弾性波トモグラフィ計測を活用した床版内部損傷を試みた研究では、RC 床版の輪荷重走行試験において計測を実施した結果、損傷の発生・進展にともなう床版断面の速度構造変化を可視化できることが明らかになった。

(2) 研究成果の活用方法・手段

RC 床版あるいは鋼床版の計画的な維持管理計画を策定する上で、本研究で対象としている損傷 (疲労等により発生・進展する目視では確認が困難なもの) を構造物調査において早期に効率よく把握することが、劣化の進行予測や補修補強等の時期の判断において極めて重要である。本研究の成果は、これまで、損傷が進展し表面に顕在化するまで検出が困難であり、その存在が構造物の構造安全性や耐久性に大きな影響を及ぼす可能性の高い欠陥を非破壊で高精度で検出する手法として活用が期待できる。

(3) 今後の展開

本研究を通して得られた成果により構築した床版の損傷に対する非破壊検査システムを広く道路橋床版の計画的維持管理に生かす上では、非破壊検査マニュアルを作成し、実際の現場において適用が容易であり、しかるべきタイミングで適確に欠陥の検出を可能とする体系まで含めた検討が必要となるものと思われる。

⑨特記事項 (本研究から得られた知見、学内外等へのインパクト等、特記すべき事項があれば記入して下さい。また、研究の目的・目標からみた、研究成果の見通しや進捗の達成度についての自己評価も記入して下さい。)

(1)鋼床版の非破壊検査技術について

本研究で得られた特筆すべき結論を以下に示す。

1)自己相関ロックイン処理プログラムを改良することにより、計測の高速化が実現した。現場計測では、赤外線カメラ1台あたり、①撮影領域の設定とフォーカス調整などに1分、②橋上を車両が走行している状態でのデータ取得に1分、③データ確認および保存に1分、④自己相関ロックイン処理に1分、合計4分で1計測箇所における計測を完了させることができるようになった。

2)デッキプレートとトラフリブの間の溶接部において溶接溶け込み量が75%以上である鋼床版を用いた輪荷重走行試験を実施し、検査面に対してより深部からデッキ貫通疲労き裂が発生・進展する場合におけるき裂検出性能を確認した。この実験では載荷回数の増加に伴い、計測結果に応力集中部が明瞭に現れ、その位置が移動していることが確認できた。この結果から、デッキ貫通型疲労き裂がより深部から発生・進展する場合にも十分な感度でき裂検出を行うことが可能であることが明らかになった。

3)実橋梁の鋼床版を対象とした計測を行うことにより、①防食塗装下にある疲労き裂の検出、②反射防止のつや消し黒色塗料を用いない計測、③地上からの遠隔計測、という現場計測条件の下での自己相関ロックインサーモグラフィによる疲労き裂検出が十分な精度を確保して実施することが可能であることが確認できた。

(2)RC床版の非破壊検査技術について

本研究で得られた特筆すべき結論を以下に示す。

1)アスファルト舗装された道路橋RC床版内部の水平ひび割れを検出する上では、受振側に加速度計を用い、衝撃入力においては床版厚に相当するピークが確認できる鋼球直径の範囲内で、できるかぎり直径の小さな鋼球を選定するのが効果的である。

2)1)の条件下で供試体実験により確認を行った結果、スペクトル上のピークの出現状況から床版厚さの広い範囲内で水平ひび割れを検出できることがわかった。ただし、欠陥深さが版厚に近い場合(水平ひび割れが底面に近い場合)この方法のみでは検出が難しい場合があることが判明した。

3)「周波数スペクトルのパターン認識を援用した新しい手法」を活用すれば、2)の欠陥検出が困難なケースにおいても、水平ひび割れを適切に検出できることが明らかとなった。

4)輪荷重走行試験に供されるRC床版に対して弾性波トモグラフィ計測の技術を適用してRC床版の内部損傷の可視化を試みたところ、輪荷重の走行回数の増加とともに損傷が発生していると考えられる弾性波の低速度帯が拡大していることが確認できた。

今後は、上記1)~4)の成果を踏まえた上で、道路橋RC床版で発生する実際の水平ひび割れを、現地で効率よく適確に評価することが可能な非破壊検査システムを構築する予定である。