

**京都大学教育研究振興財団助成事業  
成 果 報 告 書**

2021年 6月 30日

公益財団法人京都大学教育研究振興財団

会 長 藤 洋 作 様

所 属 部 局 工 学 研 究 科

職 名 講 師

氏 名 張 凱 淳

助 成 の 種 類	<b>令和 2 年度 ・ 研究活動推進助成</b>			
申請時の科研費 研究 課 題 名	A smart bridge damage detection system utilizing synchronized vehicle- bridge interaction responses			
上記以外で助成金 を 充 当 した 研 究 内 容				
助成金充当に関 わる共同研究者	(所属・職名・氏名)			
発表学会文献等	(この研究成果を発表した学会・文献等) 長谷川聡一郎, 金哲佑, 藤士尚也, 張凱淳, 走行車両の加速度を用いた路面形状同定手法の比較検討, 土木学会論文集A2(応用力学), 76(2), 1,77-1,88, 2020; 矢野友貴宏, 藤士尚也, 長谷川聡一郎, 張凱淳, 金哲佑, 橋梁応答の限定的利用による移動車両点検の検討, 2021年度土木学			
成 果 の 概 要	<b>研究内容・研究成果・今後の見通しなどについて、簡略に、A4版・和文で作成し、添付して下さい。(タイトルは「成果の概要／報告者名」)</b>			
会 計 報 告	交付を受けた助成金額	1,000,000	円	
	使用した助成金額	1,000,000	円	
	返納すべき助成金額	0	円	
	助成金の使途内訳	費 目	金 額	
		設備備品費	842,793	
		研究補助の謝金	28,000	
その他		129,207		
当財団の助成に つ い て	(今回の助成に対する感想、今後の助成に望むこと等お書き下さい。助成事業の参考にさせていただきます。) おかげさまで、数値解析、予備実験、成果の発表などを行うことができました。貴財団助成の支援に対し、深く感謝申し上げます。今後も本助成制度を継続していただけますと幸いです。			

## 成果の概要/張凱淳

### 研究内容

日本や世界の多くの橋が老朽化し、厳しい荷重や環境問題に直面しているが、非常に限られた人的資源と予算で点検・維持管理している。例えば、日本に約 72 万本の橋梁があり、2014 年から、5 年ごとに各橋梁を目視点検することは法的に義務化されている。これにより、多量の橋梁点検作業が始まるが、人口減少により、熟練技術者の数は減少している。この膨大な老朽化した橋梁を、いかに効果的で効率的に点検・維持管理していくのが重要な課題となっている。この課題に対し、移動車両の応答を利用した振動ベースの橋梁損傷検知方法が提案された。この手法では、移動車両を移動振動受信機として扱い、車両と橋梁のインタクションによって、橋梁の振動や損傷情報を収集することを目的としている。点検車両に搭載するセンサーの数が少ないため、効率性と機動性の利点があげられる。ただし、移動車両から収集できる橋梁振動情報が限られているため、その精度は限られた。

本研究では、効率性と機動性を維持しながら精度を向上させるため、移動車両点検法をベースとして、対象橋梁の上に少数のセンサーを追加して、車両と橋梁の連成動的応答を用いた橋梁損傷検知手法を提案した。車両と橋梁の振動応答を同期測定することで、車両—橋梁連成系システムや、損傷によるその変化を、より包括的に理解できると考えられる。橋梁上のセンサーは最小限の数であることが望ましいため、最も損傷しやすい箇所か、最も損傷に感度が高い箇所かに設置することが求められた。そのため、感度解析も行なった。提案手法は数値車両—橋梁モデルを用いたシミュレーションによって検証した。

### 研究成果

研究成果は、以下の通りである。

- 感度解析により、特定損傷に対する最も感度の高い応答を同定したこと

本研究では、橋梁の 1/4、1/2、3/4 スパンに想定した損傷に対し、さまざまな橋梁動的応答の感度を解析した。対象とした橋梁動的応答は、1/4 スパン・1/2 スパンでの垂直加速度・回転角加速度・垂直速度・回転角速度・垂直変位・回転角変位とそれぞれの周波数領域でのパワースペクトル密度 (PSD) および時間一周波数領域での Wavelet スペクトルだった。橋梁の損傷は、ローカルな剛性低下によってモデル化し、感度は非損傷状態と損傷状態で計算した応答またはスペクトルの相対的な差によって評価された。

感度分析の結果、特定損傷に対して最も感度の高い応答は、橋梁支間中央の回転角加速度の PSD であることが明らかになった。この橋梁応答は、損傷検知アルゴリズムに取り込まれ、車両応答と連携し、橋梁損傷検知の精度を向上することが可能だと考えられる。

- 車両一橋梁連成系の応答を用いた橋梁損傷検知アルゴリズムの提案

本研究では、車両一橋梁連成系の応答を用いた橋梁損傷検知アルゴリズムを提案した。車両応答を主要な測定対象、橋梁応答を副次的な測定対象とみなす。まず、車両一橋梁連成系システムの運動方程式を定式化した。車両は2自由度のハーフカーモデルで、橋梁は有限要素法を用いた梁要素でモデル化した。橋梁の損傷は、梁要素の剛性低下でモデル化した。次に、運動方程式を最適化問題に変換し、車両一橋梁応答の観測値と計算値の差を

最小化することを目標とした。最適化問題の変数は、対象となるすべての要素の相対剛性で、0 から 1 の範囲にあり、小さいほどダメージが大きいことを示している。最適化問題を解くための手法として、確率的勾配降下法(stochastic gradient descent, SGD)を用いた。

提案した VBI 橋梁損傷検知アルゴリズムでは、数値化された車両と橋梁モデルを用い検証した。橋梁の支間長は 41m、重量は 990 トン、8 つの梁要素でモデル化され、1 ~ 3 次曲げモードの振動数は 2.54、10.19、22.93Hz だった。移動車両の重量は 1.8 トン、バウンスモードの振動数は 2.36Hz だった。提案した損傷検知アルゴリズムを用いて、すべての要素について相対剛性を同定し、図 1 に示した。予測した剛性低下は、真値(紫の線)にあまり近づかないが、支間中間に局所的な最小値を示すことで、損傷が大まかに同定できていることがわかる。

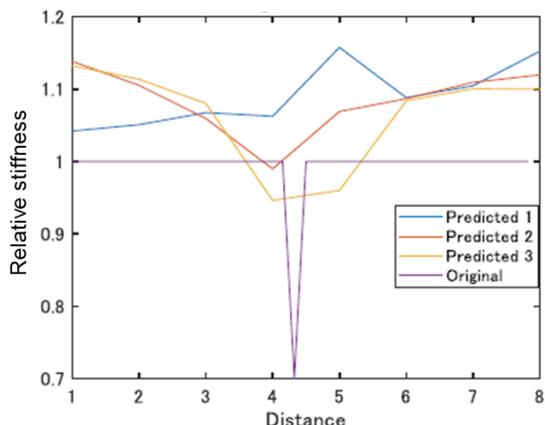


図 1 提案した損傷検知アルゴリズムを用いて同定した相対剛性

### 今後の見通し

本研究では、車両一橋梁連成系振動を利用して、橋梁損傷を同定、定量化するという初の試みを行っている。得られた予備的な結果は励みになるが、精度と実用性向上のため、さらに多くの研究を行う必要がある。一部の課題が抽出され、それらの調査は継続中だ。1)同定値と真値の間に差異があることは、提案した手法の精度向上の余地があることを示唆している。最適化問題を解くために使用される SGD 法では、目標とするグローバルミニマムではなく、望ましくないローカルミニマムに落ちる可能性が高い。より有効な解法は検討中だ。2)妥当性検証は、室内実験や現場実験で行われるべきだ。