

橋梁上の走行車両振動を用いる移動車両橋梁モニタリングの実験的検討

京都大学大学院
京都大学大学院
京都大学
京都大学大学院
京都大学大学院

学生会員
正会員
学生会員
正会員
正会員

○井上
金
長谷川
張
杉浦

真一
哲佑
聡一郎
凱淳
邦征

1. はじめに

今までの橋梁振動モニタリングは、橋梁にセンサを設置し、その計測データから橋梁の性能変化を推定するのが主流であった。一方で橋梁振動特性の間接的な推定を目指し、橋梁上を走行する車両の振動応答成分から橋梁の振動数を抽出する試みも行われている¹⁾²⁾。移動車両の振動から橋梁の動的特性を把握することができれば、効率的なモニタリングツールになりうる。しかしながら車両振動には路面凹凸の影響が大きく現れるため、橋梁の振動成分が埋もれる可能性も高い。その対策として、同じ振動特性を持つ2台のトレーラーを車両にけん引させ、トレーラー同士の振動応答を差引くことによる路面凹凸の影響の低減が数値解析により検討されている。本研究では、移動車両橋梁モニタリング²⁾の実現性を検討するために実験による検討を行い、その結果を報告する。

2. 走行車両模型橋梁実験

実験に使用する橋梁モデルは、Fig.1 に示すようなスパン長 5.4m の I 型断面鋼桁とし、模型モデルの一次固有振動数および減衰比を Table 1 に示す。

車両モデルとして、Fig.2 に示すような、トラクター1台と同じ振動特性を持つトレーラー2台を連行走行させるモデルを使用する。それぞれの諸元を Table 2 に示す。走行速度は 1.05m/s、サンプリング間隔は 100Hz とする。

3. データ処理

時間領域での減算として、トレーラー1 の加速度応答(acc1)からトレーラー2 の加速度応答を位相が合うようにタイムシフトしたもの(acc2)を差し引いた後、FFT を行うこと (FFT[acc-acc2]と称する) で路面凹凸の影響低減を試みる。また、周波数領域の減算として、トレーラー1 の加速度応答のフーリエスペクトルからトレーラー2 の加速度応答のフーリエスペクトルを差し引く (FFT[acc1]-FFT[acc2]と称する) ことで路面凹凸の影響の低減を図る。

4. 実験結果

実験により計測されたトレーラーの加速度応答の一例を Fig.3 に示す。また加速度および減算加速度のフーリエスペクトルを Fig.4 に示す。Fig.4 の 2.4Hz の縦の赤線はトレーラーの振動数を、3.5Hz と 3.7Hz の縦の青線は車両-橋梁連成系の走行車両による本来の橋梁振動数の前後にシフトされる橋梁振動数 (式1) を表す。

$$f_b \pm \frac{v}{2L}$$

(1)

ここに f_b は橋梁振動数、 v は走行速度、 L は橋梁のスパン長を表す。

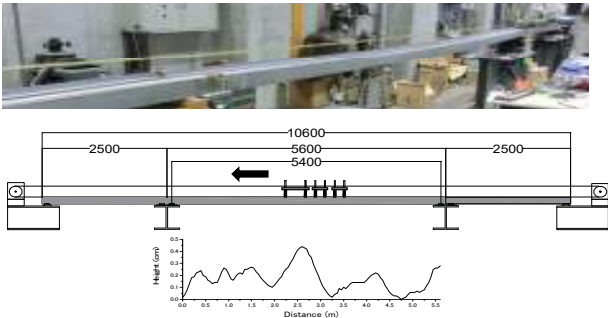


Fig. 1 Scaled bridge and roughness.

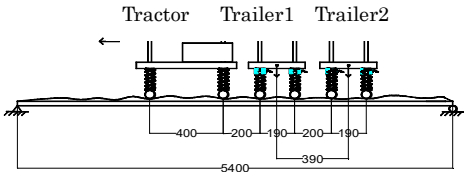


Fig. 2 Tractor and trailer models.

Table 1 Bridge properties.

Span length (m)	5.4
1 st natural frequency (Hz)	3.64
Damping ratio	0.011

Table 2 Vehicle properties.

	Tractor	Trailer 1 & 2
Total mass (kg)	19.67	7.68
Bounce frequency (Hz)		
Front axle	2.91	2.43
Rear axle	2.91	2.43

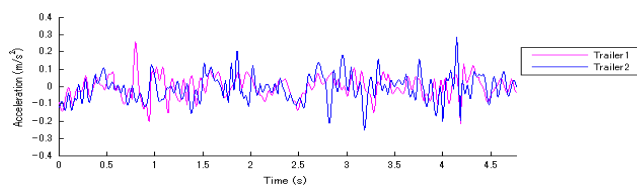
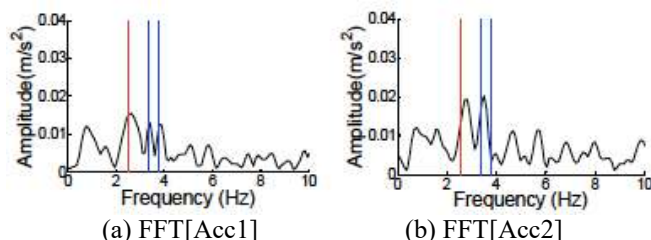
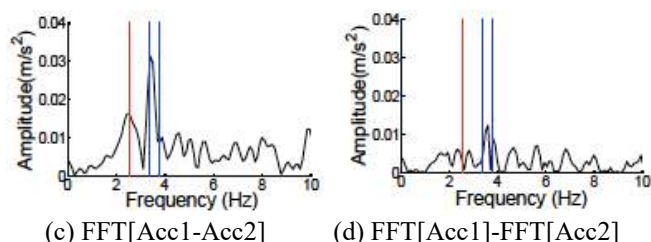


Fig. 3 Accelerations of two trailers.



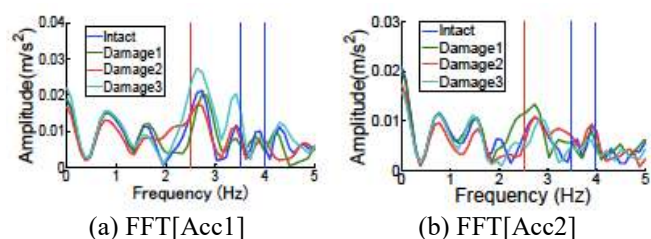
(a) FFT[Acc1]

(b) FFT[Acc2]



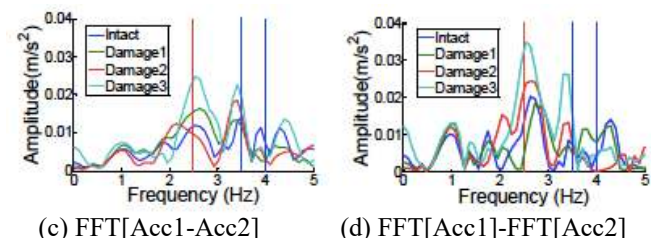
(c) FFT[Acc1-Acc2]

(d) FFT[Acc1]-FFT[Acc2]

Fig. 4 Fourier amplitudes of trailer vibrations from the laboratory experiment (Acci: acceleration of Trailer i , red line: trailer freq., blue lines: shifted bridge freq.).

(a) FFT[Acc1]

(b) FFT[Acc2]



(c) FFT[Acc1-Acc2]

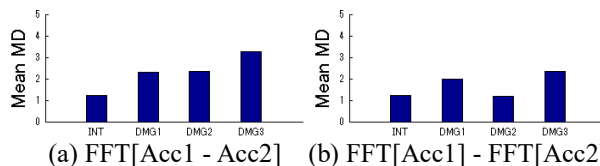
(d) FFT[Acc1]-FFT[Acc2]

Fig. 5. Averaged Fourier spectra of trailer vibrations from laboratory experiments w.r.t damage severity (Acci: acceleration of Trailer i , red line: trailer freq., blue lines: shifted bridge freq.).

FFT[acc1-acc2]のおよび FFT[acc1]-FFT[acc2]のフーリエスペクトルより、2Hz 以下の低周波数帯で卓越が弱くなり、橋梁の振動数付近の 3.5Hz と 3.7Hz 間の卓越がより目立つことがわかる。

5. 移動車両橋梁モニタリングによる異常検知

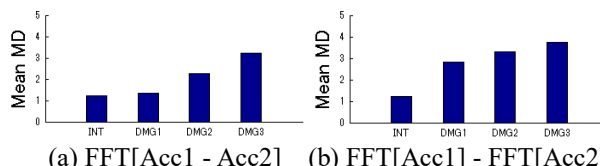
橋梁振動数の変化を検知する異常検知について検討するため、疑似損傷として橋梁の支間中央に質量を付加させ、橋梁の振動数を変化させた。軽いものから、8.3kg (Damage1), 12.8 kg (Damage2), 17.2 kg



(a) FFT[Acc1 - Acc2]

(b) FFT[Acc1] - FFT[Acc2]

Fig. 6. Mean values of the MD of areas of Fourier amplitude between 3.5Hz to 4.0Hz.



(a) FFT[Acc1 - Acc2]

(b) FFT[Acc1] - FFT[Acc2]

Fig. 7. Mean values of the MD of areas of Fourier amplitude between 3.0Hz to 3.5Hz.

(Damage3), それぞれ橋梁一次固有振動数が、3.52Hz, 3.47Hz, 3.42Hz となっている。

Fig.5 にトレーラー2 台の加速度応答を差し引いたフーリエスペクトルを示す。Fig.5 から分かるように橋梁の疑似損傷によって、特に走行車両により橋梁振動数の前後にシフトされる橋梁の振動数の間の Fourier 振幅に変化が現れる。本研究では、疑似損傷による Fourier 振幅の変化を定量的に検討するため、統計的距離の一つである Mahalanobis Distance (MD) を用いる。3.5Hz から 4.0Hz の間の MD の平均値を Fig. 6 に示す。FFT[acc1-acc2]の方がFFT[acc1]-FFT[acc2]より損傷による変化が大きく現れた。一方で、3.0Hz から 3.5Hz の間の MD の平均値 (Fig. 7)を検討すると、FFT[acc1]-FFT[acc2]の方がFFT[acc1-acc2]より損傷による変化が明確であることが分かる。いずれのケースでも異常検知の可能性が読み取れる。これは、橋梁の振動数付近であり、橋梁の振動特性変化の影響が大きく出たためだと考えられる。

6. まとめ

本研究では、移動車両橋梁モニタリングの実現可能性について走行車両模型橋梁実験を用い検討を行った。実験結果から、応答の差し引きによる移動車両点検手法の可能性が示された。また、異常検知実験から、橋梁の振動数を含む振動数帯では、損傷レベルが大きくなるにつれて MD の値が大きくなり、移動車両橋梁モニタリングによる異常検知の可能性を示唆する。

【参考文献】1) Yang, YB, Lin, CW and Yau, JD. Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle, Journal of Sound and Vibration Vol. 272, pp.471-493, 2004; 2) Kim, CW, Iseimoto, R, McGettrick, PJ, Kawatani, M, and O'Brien, EJ. 2014. Drive-by bridge inspection from three different approaches, Smart Structures and Systems, Vol.13, No. 5, pp.775-796, 2014.