

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630193

研究課題名(和文)同期計測された車両群を利用した沿線橋梁の固有振動数一括抽出手法の構築

研究課題名(英文) Bridge natural frequency estimation by extracting the common vibration components from vehicles

研究代表者

長山 智則 (Nagayama, tomonori)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80451798

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：橋梁など構造物の挙動や性能を適切に把握することは、設計や管理において考慮すべき不確定性を低減し、効率的な建設・維持管理によるコスト削減や安全性向上をもたらすと期待される。構造物の現状を設計時の想定と比較したり、経年変化を把握したりする指標としては、固有振動数が多く利用されてきた。しかし、橋梁は極めて多数で、それらの動特性把握には手間と時間を要し、データの把握・蓄積には至っていない。本研究では、複数の移動車両に加速度計とGPSを設置し、互いに正確な時刻同期をとりながら橋梁上を走行することで、橋梁振動特性を把握する、簡便な方法を開発し、実橋梁で検証を行った。

研究成果の概要(英文)：Understanding on the actual behavior and the performance of bridges are expected to improve the safety and reduce the construction/management cost by eliminating uncertainty in the design and management process. Bridge natural frequencies have been widely used in understanding the dynamic behavior of bridges. However, identification of natural frequencies of numerous bridges require time and cost; such a fundamental property as natural frequency has not been acquired for the majority of bridges. In this research, multiple vehicles are installed with accelerometers and GPS so that the vehicles' dynamic motions are captured in a synchronous manner. Common vibration components are extracted to identify the natural frequencies of bridges. The identification capability has been demonstrated on a steel girder bridge.

研究分野：構造物および車両の動力学，モニタリング

キーワード：橋梁固有振動数 同期計測 車両 加速度 GPS

1. 研究開始当初の背景

橋梁などの構造物の状態把握には固有振動数が利用されてきた。固有振動数には系全体の質量・剛性などが反映されることから、設計時に想定していた構造と完成後の実構造物が整合的であるか総合的に判断したり、経年劣化や地震・台風などの大きな外力により構造上の大きな変化が生じていないか判断したりするための補助指標として利用されてきた。

しかし、今日においても動特性把握には手間と時間を要するため、多数の橋梁を管理する道路事業者や自治体では、データの把握・蓄積には至っていない。一部の鉄道事業者には、橋梁の動特性値を把握している管理者もあるが、計測やデータの更新は頻繁には行われていない。

車両応答を計測して橋梁の動特性を評価する試みは、手法の簡便性から期待が大きく、多くの研究がなされてきた。梁上を移動する1自由度車両モデルの理論応答に始まり、単独車両やトレーラー型連行車両応答から固有振動数を推定する実験的試み、起振車両で橋梁振動を励起しつつ計測車両を走らせるものなど報告されている。しかし、応答が微小である、起振・計測車両が橋梁と動的に連成する、非定常現象で解析が難しいといったことから、シミュレーションや室内模型、特定形式の実橋梁における試みにとどまり、実用に供されるには至っていない。計測信号から橋梁応答成分を抽出することが困難であった。

2. 研究の目的

本研究では、複数の移動車両に加速度計とGPSを設置し、互いに正確な時刻同期をとりながら橋梁上を走行することで、橋梁振動特性を把握する、簡便な方法を開発し、実橋梁で検証を行う。

3. 研究の方法

研究代表者はこれまで無線センサやGPSを利用した同期計測技術の開発や、同期計測信号からの共通信号抽出アルゴリズムを開発してきた。この同期計測技術を利用して、複数の車両応答を同期計測・解析することで動特性同定を行う新たな方法を構築した。

まず、橋梁と車両が連成して振動する系を数値シミュレーションにより再現し、複数車両が橋梁上を走行する場合の車両加速度応答を算出する。2車両のか速度応答の共通成分を抽出し、固有振動数推定を行う。本シミュレーションを、様々な車両速度、車両間隔などのパラメータについて実施し、固有振動数推定が可能な条件を明らかにする。

続いて、中小スパンの橋梁を対象に計測試験を実施し、手法の妥当性を評価する。

4. 研究成果

4.1 共通振動成分抽出方法

橋梁上を走行する車両の加速度応答から橋梁固有振動数成分を推定する研究は従来もなされてきたが、複数の振動数成分から橋梁の固有振動数成分を分離することが特に難しい課題であった。図1はある橋梁上を走行する1台の車両の鉛直加速度応答のスペクトルであるが、2.1Hz付近の橋梁固有振動数以外にも複数のスペクトルピークが卓越している。路面プロファイルに起因する成分、車両特性に起因する成分などがそれぞれ卓越し得る。固有振動数の範囲が既知でない限り、橋梁固有振動数を唯一に決定することが難しい。

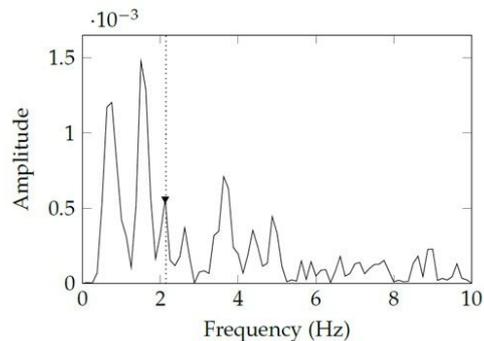


図1 橋梁上を走行する車両の加速度応答

そこで、本研究では、複数車両が橋梁上を走行するケースを考え、それらに共通する成分を検討した(図2)。車両特性の異なる車両の場合、車両の固有振動数に起因する成分は車両毎に異なる。路面凹凸に依存する成分は、車両の走行パスが同じ限り両車両に共通するものの、車両走行速度や車両走行パスが同一ではないこと、路面凹凸成分が狭い周波数帯域にのみ集中していることは少ないことなどから、複数車両に共通した鋭敏なピークとなることは考えにくい。一方で橋梁の固有振動数に由来する成分は両車両の加速度応答に共通して存在すると考えられる。ここでは、共通する成分を抽出する方法として、1) パワースペクトルのスタッキング、2) クロススペクトル、3) 周波数領域のモード同定手法である Frequency Domain Decomposition 法を検討した。1)、3) は3台以上の車両応答信号にも適用できる利点はあるものの3手法を比較した結果、位相情報を考慮できる2) クロススペクトルによる方法が最も高い確率で橋梁固有振動数を同定可能である事がわかったため、以後、クロススペクトルを用いた方法について述べる。

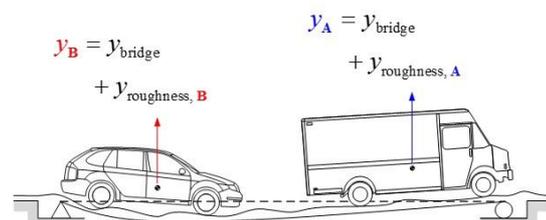


図2 2台の車両の振動成分

信号 x および y のクロススペクトル推定量 $\widehat{G}_{xy}(f)$ は以下の式 (1) により求める。

$$\widehat{G}_{xy}(f) = \frac{2}{n_d T} \sum_{k=1}^{n_d} X_k^*(f) Y_k(f) \quad (1)$$

ここで、 $X_k(f)$ 、 $Y_k(f)$ はそれぞれ x 、 y のフーリエ変換である。T は時刻歴サンプルの継続時間である。

4.2 数値シミュレーション

図3のように単純支持梁の上を2軸のハーフカーが走行するモデルを構築した。車両、橋梁はそれぞれ式(2)、(3)の運動方程式に従う。両者をタイヤにおける接触力により接続し、連成を考慮したシミュレーションを行った。なお、図3では車両を1台のみ示しているが実際は図4のように2両の車両が同じ梁上を走行するシミュレーションをしている。図4にはシミュレーションにより得られた車両加速度応答時刻歴も示している。

$$\begin{aligned} & [M_v] \{\ddot{\mathbf{u}}_v\}_{t+\Delta t} + [C_v] \{\dot{\mathbf{u}}_v\}_{t+\Delta t} + [K_v] \{\mathbf{u}_v\}_{t+\Delta t} \\ & = \{\mathbf{F}_v\}_{t+\Delta t} - \{\mathbf{q}_{vc}\}_{t+\Delta t} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & [M_b] \{\ddot{\mathbf{u}}_b\}_{t+\Delta t} + [C_b] \{\dot{\mathbf{u}}_b\}_{t+\Delta t} + [K_b] \{\mathbf{u}_b\}_{t+\Delta t} \\ & = \{\mathbf{F}_b\}_{t+\Delta t} - \{\mathbf{q}_{bc}\}_{t+\Delta t} \end{aligned} \quad (3)$$

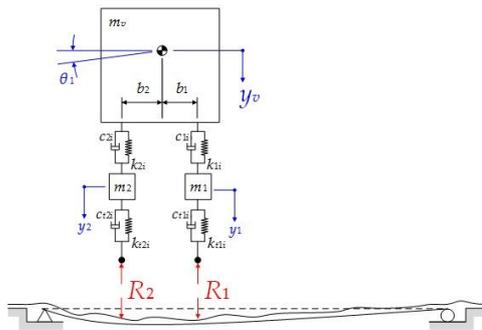


図3 車両・橋梁連成解析モデル

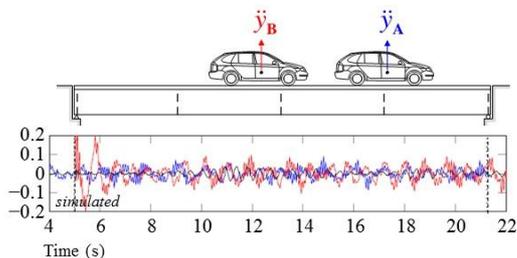


図4 車両加速度応答シミュレーション値シミュレーションにより得られた加速度応答から、2台の車両が共に橋梁上にある時間

帯のデータを抽出し、これを式(1)に従って解析した。図5は車両A,Bそれぞれのパワースペクトル、図6は両者のクロススペクトルである。パワースペクトルには橋梁に起因するスペクトルピークに加えて多数の卓越ピークがあり、これらから橋梁固有振動数を同定することは困難である。一方で、クロススペクトル上では橋梁固有振動数に相当する約2.18Hzに鋭敏なピークが確認できる。

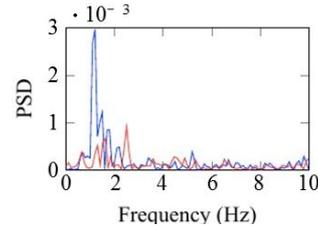


図5 2台の車両の加速度応答パワースペクトル

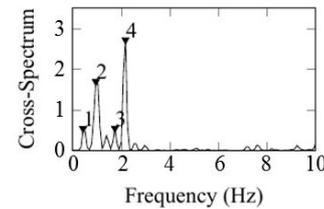


図6 2台の車両の加速度応答クロススペクトル

客観的に橋梁固有振動数を推定・選択するための基準を提案した。ピークの鋭敏度を表す指標として Clarity Index を式(4)のように定義した。

$$I_i = \frac{G(w_i)}{\frac{1}{n} \sum_{w=w_i}^{w_u} G(w)}$$

橋梁の固有振動数としては、1) 本指標が3以上であること、2) それぞれの信号のパワースペクトルに対しても Clarity Index を計算しクロススペクトルの Clarity Indexの方が大きな値を示すこと、3) パワースペクトルの Clarity Index に対するクロススペクトルの Clarity Index の増分が最も大きいこと、の3つを基準に選定した。図5, 6のスペクトルに対して Clarity Index の増分を計算すると表1の通りである。約2.18Hzの第4のピークの増分が最も高く、橋梁の固有振動数であると決定できる。

表1 Clarity Index の増分

Vehicle	Peak			
	#1 0.436 Hz	#2 0.959 Hz	#3 1.744 Hz	#4 2.180 Hz
A	3.93	5.70	-0.11	17.94
B	4.01	12.30	0.76	16.60

次に、車両走行速度、2 車両間の間隔を変えて、橋梁固有振動数推定可能な条件を検討した。時速 5km/h から 80km/h まで、車両間の間隔は 1m から 10m としている。Clarity Index は図 7 のようになり、走行速度 40km/h 以下程度で比較的大きい値を示す。同様にして上記 1) - 3) の判断基準を適用することで橋梁固有振動数を推定可能か否かを図 8 にコンター図で示す。グレーで示す領域で、推定可能である。図 8 には合わせて、赤、青の領域も示してあるが、これは各車両のパワースペクトルのみから最大のピークを抽出することで橋梁固有振動数を推定可能な領域を示している。パワースペクトルを利用する場合は推定可能な条件が極めて限定されてしまうものの、クロススペクトルを利用することで様々な条件で振動数推定が可能である。

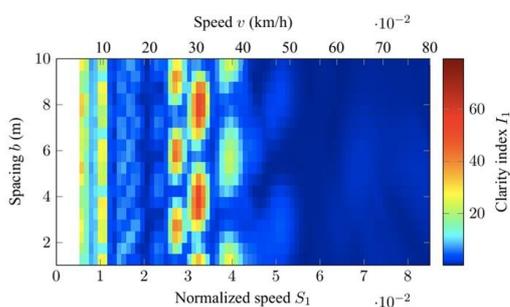


図 7 走行速度、車両間隔と Clarity Index

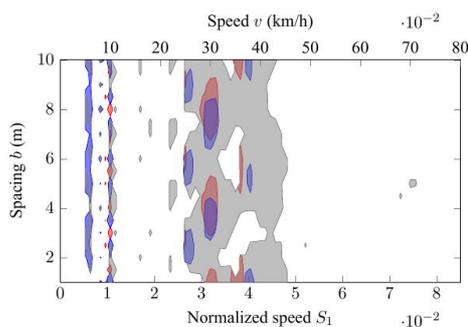


図 8 走行速度、車両間隔と固有振動数推定可否

次いで、2 車両間の計測信号同期誤差の影響を検討した。同期誤差が 0 - 5 秒の間で増大すると、Clarity Index が次第に小さくなる事が確認できた(図 9)。実測に当たっては同期誤差が小さいことが望ましい。

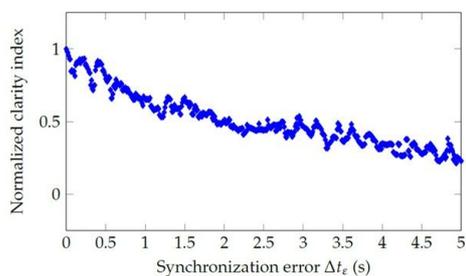


図 9 Clarity Index と同期誤差

4.3 実測による検証

千葉県君津市に掛かる月毛橋において実験を行った。本橋梁は径間 59m の鋼箱桁橋で鋼重は 260 トンである。車両 2 台(ハイエースとランドクルーザー)に高精度 MEMS 型加速度計および GPS による同期データ収録装置(図 10)を設置し走行試験を行った(図 11,12)。なお、橋梁上にも加速度センサを設置し、橋梁振動を直接計測することで、振動数の真値を得ている。走行パターンは表 2 に示す 4 パターンで、時速 10km/h から 30km/h の範囲である。

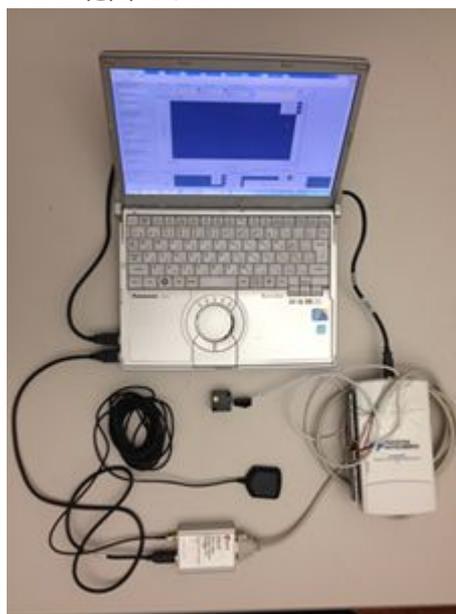


図 10 同期計測システム



図 11 2 車両による走行試験



図 12 センサの車内設置状況

表2 実橋梁走行試験走行速度

Case #	Driving speed v (km/h)	
	Vehicle A	Vehicle B
1	10	10
2	15	10
3	30	30
4	30	25

図 13 - 14 にケース 2 の場合の加速度のスペクトルを示す．それぞれの車両の加速度応答パワースペクトルには卓越するピークが多数あり，橋梁固有振動数を同定することは困難であるが（図 13）クロススペクトルには鋭敏の 1 つのピークが存在する（図 14）．ピーク選定判定条件 1） - 3）を適用するとこの鋭敏なピークが抽出できる．

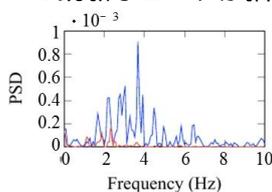


図 13 実橋梁走行試験パワースペクトル

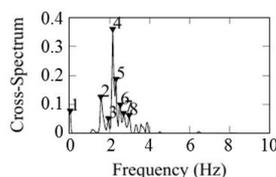


図 14 実橋梁走行試験クロススペクトル

表3 Clarity Index の増分（実測）

Vehicle	Peak				
	#1 0.054 Hz	#3 1.957 Hz	#4 2.174 Hz	#5 2.337 Hz	#8 2.989 Hz
A	3.70	0.66	20.28	9.50	-1.25
B	5.36	-4.26	13.55	-0.72	2.73

他のケースについても同様に振動数を抽出することが出来た．複数回の計測を繰り返した所，平均値は 2.186Hz（橋梁に直接設置した加速度計による推定値は 2.168Hz），分散は 0.083Hz であった．必ずしも毎回正確な値が求まるわけではないが，複数回計測を繰り返せば平均値として固有振動数を推定可能であることが確認出来た．

5．主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 1 件)

A. Reksowardojo, T. Nagayama, D. Su, and T. Mizutani: “Bridge natural frequency

estimation by extracting the common vibration component from the responses of two vehicles”, 第 70 回土木学会年次学術講演会, 2015.9

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6．研究組織

(1)研究代表者

長山 智則 (NAGAYAMA TOMONORI)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号: 80451798

(2)研究分担者

()

研究者番号:

(3)連携研究者

()

研究者番号: