

たわみ影響線の変化に着目した BWIM による橋梁の異常検知の可能性検討

Feasibility investigations on bridge damage detection using BWIM focusing on changes in deflection influence line

横山拓海*, 長谷川聡一朗**, 金哲佑†, 齊藤隆仁***, 池田大造****
 Takumi Yokoyama, Soichiro Hasegawa, Chul-Woo Kim, Takato Saito, Daizo Ikeda

*京都大学, 工学研究科社会基盤工学専攻修士前期課程 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

**京都大学, 工学研究科社会基盤工学専攻博士後期課程 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

†博士 (工), 京都大学教授, 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

***NTT ドコモ, サービスイノベーション部 (〒100-6150 東京都千代田区永田町 2 丁目 11 番 1 号)

****博士 (工), NTT ドコモ, サービスイノベーション部 (〒100-6150 東京都千代田区永田町 2 丁目 11 番 1 号)

This study investigates feasibility of bridge damage detection using BWIM and deflection of the bridge. A virtual axle is introduced to the vehicle so that increase of identified wheel loads caused by changes in deflection influence line due to damage can be distributed to the virtual axle. Investigating the identified wheel load of the virtual axle which should be zero in a pristine condition of the bridge theoretically, we can examine the possibility of damage in the bridge. Both model bridge damage experiments and simulations showed changes in the wheel load of the virtual axle due to damage in the bridge. Observations imply that selecting a proper location of the virtual axle would improve the accuracy of delivering increased virtual wheel load due to bridge damage.

Key Words: BWIM, damage detection, displacement, influence line

キーワード: BWIM, 損傷検知, 変位, 影響線

1. はじめに

現在, 我が国の橋梁において, 高度経済成長期に架設されたものが過半数を占めており¹⁾, 橋梁の維持管理および損傷の早期発見が大きな課題となっている. 現行の維持管理は平成 26 年度の道路橋定期点検要領の改正に伴い, 全橋梁に対して 5 年に 1 度の定期点検が必要となった. 定期点検は専門的な知識および技術に基づく点検が必要となるが, 点検費用や技術者の不足により, 効率的で定量的な橋梁の点検手法および適切な維持管理が求められている. このような背景から橋梁の損傷程度や耐荷力の算定を可能にし, さらに橋梁の状態を迅速, 高精度, かつ簡易的に把握できるような手法の確立が喫緊の課題となっている.

近年, 目視を基本とする定期点検に代わる, あるいは従来の点検を補助できる技術として, センサを用いた構造ヘルスマモニタリングの研究が注目されてきた. その結果, 平成 31 年度の道路橋定期点検要領²⁾では, 監視すな

わちモニタリングが措置の一つとして新たに加わった.

橋梁構造物のモニタリングにおいて, 構造物全体の性能変化を評価できる物理量として変位は有効であるが, 固定点を必要とするため, 制約の多い河川や海を渡る橋梁のモニタリングには適さず, 固定点を必要としない加速度センサを用いた研究が多く進められている³⁻⁷⁾. 一方で, 近年の画像処理技術の発展, デジタルカメラの高解像度化, さらに深層学習や人工知能 (AI) 技術の発展により, 動画画像解析による橋梁の変位同定が可能になってきた⁸⁻¹⁰⁾. 加速度計測から高精度の変位同定に関する研究¹¹⁾も報告されており, 橋梁構造物モニタリングへの変位の活用も可能になりつつある. ただし, 計測変位を設計時の許容変位と比較し, 安全性や異常判断に活かせる可能性はあるが, 変位が同定されても, 外力の情報がないと変位から異常を判断するのは容易ではない.

一方で, 橋梁の変位を用いた損傷検知手法として, 橋梁変位の影響線による Bridge Weigh-In-Motion¹²⁻¹³⁾ (以下 BWIM) の利用が考えられる. 交通荷重を測定する手法に, 車両が橋梁上を通過した際に生じる橋梁部材の局部応答から, ひずみ影響線を逆解析して車両重量を推定する BWIM が Moses¹⁴⁾によって提案されている. ひずみの

† 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: kim.chulwoo.5u@kyoto-u.ac.jp

影響線に代わって橋梁変位の影響線から BWIM を適用することで、車両の重量あるいは軸重を同定することは理論的に可能である¹²⁻¹³。しかしながら、BWIMに用いられる影響線は橋梁に損傷がないこと、つまり橋梁の剛性変化による影響線の変化がないことを前提としている。損傷に伴う橋梁の剛性変化により影響線が変化する場合、影響線の変化分が軸重に加わり、実際より軸重が過大に推定されることが考えられる。ここで、実際より重く同定された重量の変化分を抽出することが出来れば、損傷による橋梁の影響線の変化を示す指標となりうる。

そこで本研究では、橋梁変位による BWIM に着目し、損傷による変位の影響線の増加による軸重の変化を検知する手法を提案する。具体的には、橋梁変位による BWIM の軸重同定過程において、実際の車両には存在しない仮想の車軸を導入して、仮想軸に割り当てられる重量を測定することで橋梁の損傷を検知する手法の可能性検討を目的とする。仮想軸を用いる手法では、基準となる影響線を取得していれば、新規に影響線を取得するための軸重が既知の車両による走行試験を必要としない利点がある。また、軸間距離や速度に誤差がある場合でも、最小二乗法を使用することにより誤差を補完するように軸重同定が行われるが、損傷に伴うたわみ影響線の形状変化は全体的に影響するため、あらゆる車両での適用可能性が考えられることに加え、損傷評価の指標として扱うことができる利点も挙げられる。

本研究では、模型車両が模型橋梁上を走行する室内実験と車両-橋梁連成振動のシミュレーションを行い、たわみを用いた BWIM による橋梁の異常検知の可能性を検討する。

2. BWIM による橋梁の異常検知理論

2.1 たわみ影響線

車両の軸重や軸数、軸間距離など車両諸元が既知である実験車両の走行により計測された変位応答を用いて、たわみ影響線を求める。N 軸の車両が走行したとき、測定点における変位応答は、各車軸によって生じる応答の重ね合わせとして時間の関数で表される。このとき、車両速度と各軸重が既知であれば、軸間距離を車両速度で除した時間間隔と各軸重から、時間の関数として表されたたわみ影響線が求まる¹⁵。

既知の軸重を列ベクトル $\mathbf{P}_b = \{P_{b1}, \dots, P_{bN}\}^T \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ として、この車両が橋梁を通過したときに計測される離散変位応答の列ベクトル $\mathbf{D}_b = \{D_b(1), \dots, D_b(K)\}^T \in \mathbb{R}^{K \times 1}$ を考える。ただし、ここで K は変位の離散タイムステップの個数を表すものとし、測定箇所での時刻 t における変位応答 $D_b(t)$ はたわみ影響線と軸重との線形関係式より以下のように表される¹⁶。

$$D_b(t) = \sum_{i=1}^N P_{bi} I_b(t - C_i) \quad (1)$$

$$C_i = \frac{s_i f}{v} \quad (2)$$

ここで、 $I_b(t)$ は時間の関数として表されるたわみ影響線で、 C_i は与えられる最前軸と i 軸との軸間距離である s_i に対応する時間間隔である。また、 f はサンプリング周波数、 v は車両の走行速度を表している。

各軸の影響線からなる行列 \mathbf{I}_b は以下のように表される。

$$\mathbf{I}_b = \begin{bmatrix} I_b(1) & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ I_b(K - C_N) & \ddots & 0 \\ 0 & & I_b(1) \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & I_b(K - C_N) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{K \times N} \quad (3)$$

$I_b(t)$ の表記では各タイムステップにおいて、軸の種類が判別できない。そこで、各軸におけるたわみ影響線のゼロである部分も影響線の一部として捉え、以降行列 \mathbf{I} の時刻 t における k 軸目の影響線の要素を I_{btk} として表す (式(4-1)参照)。この影響線からなる行列 \mathbf{I}_b に仮想の軸による影響線を追加することで (式(4-2)参照)、仮想軸における軸重 (本来は存在しないため 0kgf) に損傷による影響線の変化分が割り当てられ、その値をもとに損傷検知の可能性を検討する。

$$\begin{bmatrix} I_{b11} & \dots & I_{b1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{bK1} & \dots & I_{bKN} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{K \times N} \quad (4-1)$$

$$\begin{bmatrix} I_{b11} & \dots & I_{b1N} & I_{b1N+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ I_{bK1} & \dots & I_{bKN} & I_{bKN+1} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{K \times (N+1)} \quad (4-2)$$

2.2 仮想軸の概念を導入した BWIM の手法

走行する車両の実際の軸重を列ベクトル $\mathbf{P}_m = \{P_{m1}, \dots, P_{mN}\}^T \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ 、この車両が橋梁を通過するときに新たに計測される離散変位応答を列ベクトル $\mathbf{D}_m = \{D_m(1), \dots, D_m(K)\}^T \in \mathbb{R}^{K \times 1}$ 、同定される軸重を列ベクトル $\mathbf{P} = \{P_1, \dots, P_N\}^T \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ として、たわみ影響線の変化がないことを前提に、Moses¹⁴の手法に倣い、理論値と実測値の残差の二乗和を最小にする解を最適解とみなして、軸重推定を行う。式(5)の目的関数を軸重で微分したものをゼロとするものが同定される軸重である。なお、速度および軸間距離は既知であるものとする。

$$E = (\mathbf{D}_m - \mathbf{I}_b \mathbf{P})^T (\mathbf{D}_m - \mathbf{I}_b \mathbf{P}) \quad (5)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \mathbf{P}} = \frac{\partial (\mathbf{D}_m - \mathbf{I}_b \mathbf{P})^T (\mathbf{D}_m - \mathbf{I}_b \mathbf{P})}{\partial \mathbf{P}} = -2\mathbf{I}_b^T \mathbf{D}_m + 2\mathbf{I}_b^T \mathbf{I}_b \mathbf{P} = \mathbf{0} \quad (6)$$

$$\mathbf{P} = (\mathbf{I}_b^T \mathbf{I}_b)^{-1} \mathbf{I}_b^T \mathbf{D}_m \quad (7)$$

ここで、上付き文字 T は行列の転置を意味する。

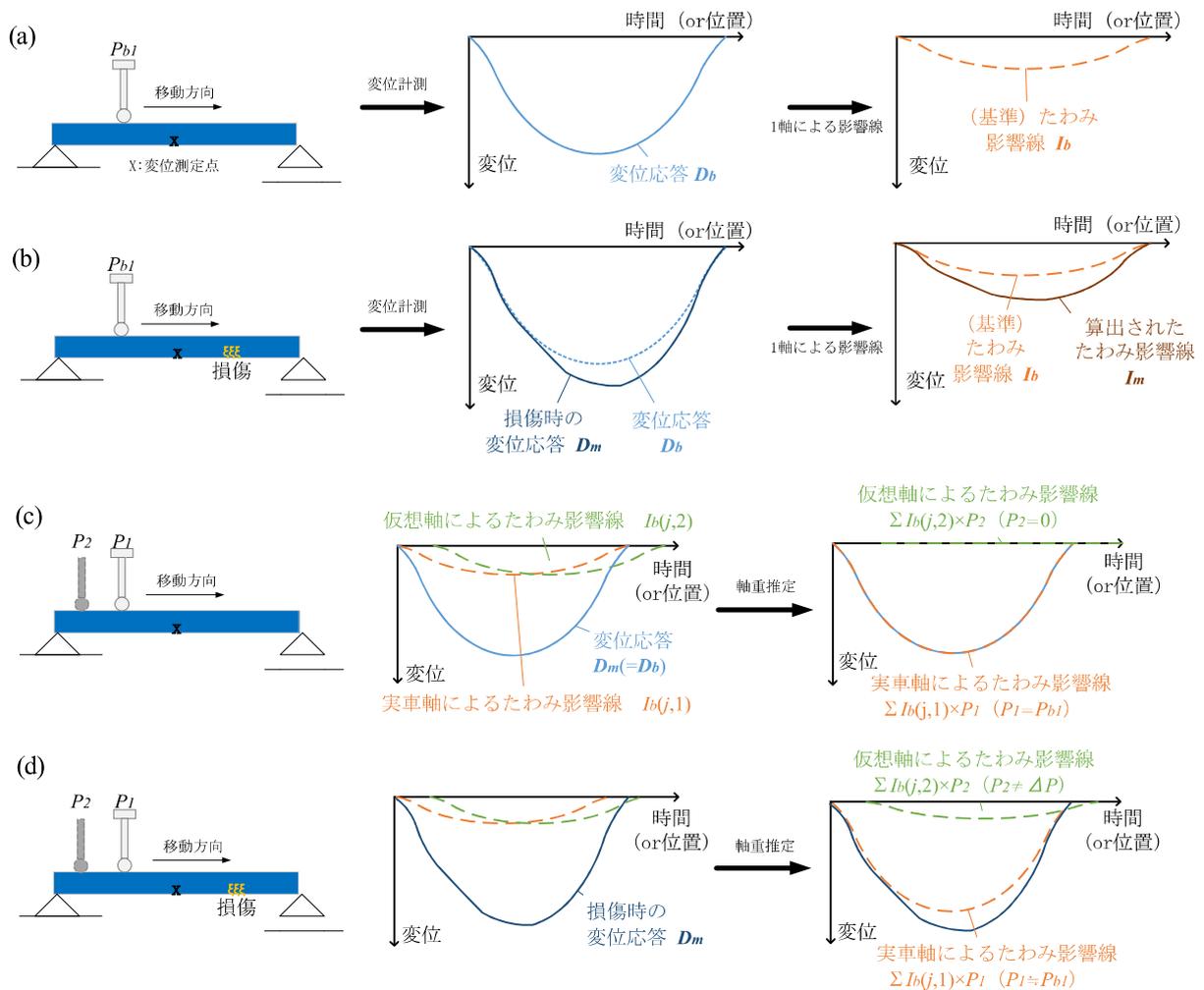


図-1 たわみ影響線と仮想軸の模式図

通常の BWIM ではたわみ影響線が変化しないことを前提としている。言い換えると、新たに計測された変位応答から得られるたわみ影響線を $I_m \in \mathbb{R}^{K \times N}$ 、基準たわみ影響線を $I_b \in \mathbb{R}^{K \times N}$ とすると、 $I_m = I_b$ が成り立つことを前提としている。しかし、前節で述べたように、損傷を受けて橋梁の剛性が低下すると、たわみ影響線は増加する。そのときのたわみ影響線の増加分を ΔI とすると、損傷を受けた橋梁のたわみ影響線は、 $I_m = I_b + \Delta I$ となる。損傷により $I_b < I_m$ となるにも関わらず、たわみ影響線の変化を考慮せずに、 $I_m = I_b$ として BWIM を適用すると、同定軸重 P は実際の軸重 P_m より大きくなる。損傷によるたわみ影響線の変化を考慮する場合は、損傷によるたわみ影響線の増加分を同定軸重に上乗せて $P_m + \Delta P$ のように計算される。重く同定された分の軸重 ΔP を抽出することが出来れば、それが損傷による橋梁のたわみ影響線の変化を示す指標となる。

説明を簡易化するため、本来存在し得ないが1軸の車両が通過する事例を考える。1軸車両走行による変位応答 D_b と基準となるたわみ影響線 I_b を図-1(a)に示す。次に損傷状態による変位応答 D_m とその際に得られるたわ

み影響線 I_m を図-1(b)に示す。図-1(a)と図-1(b)から損傷によるたわみ影響線への影響が分かる。

1軸しかない車両であるが、軸間距離が既知であるもう1つの仮想の軸があると仮定する。以下に示す提案手法の式展開では、説明のために仮想軸の軸重や変化したたわみ影響線を使用しているが、最終的にはこれらは既知である必要はない。損傷による変位と軸重との関係は、式(8)に示すようにたわみ影響線を用いて定式化できる。

$$D_m = I_m P_m \quad (8)$$

式(7)に式(8)を代入し展開すると、式(9)が得られる。

$$P = (I_b^T I_b)^{-1} I_b^T I_m P_m \quad (9)$$

議論を見やすくするために、式(9)の $I_b^T I_b$ を以下のように置き換えて整理する。

$$I_b^T I_b = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^K I_{bj1}^2 & \sum_{j=1}^K I_{bj1} I_{bj2} \\ \sum_{j=1}^K I_{bj2} I_{bj1} & \sum_{j=1}^K I_{bj2}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (10)$$

ここで、 I_{bj1} と I_{bj2} はそれぞれ実車軸と仮想車軸による j 時刻の基準たわみ影響線を表す。

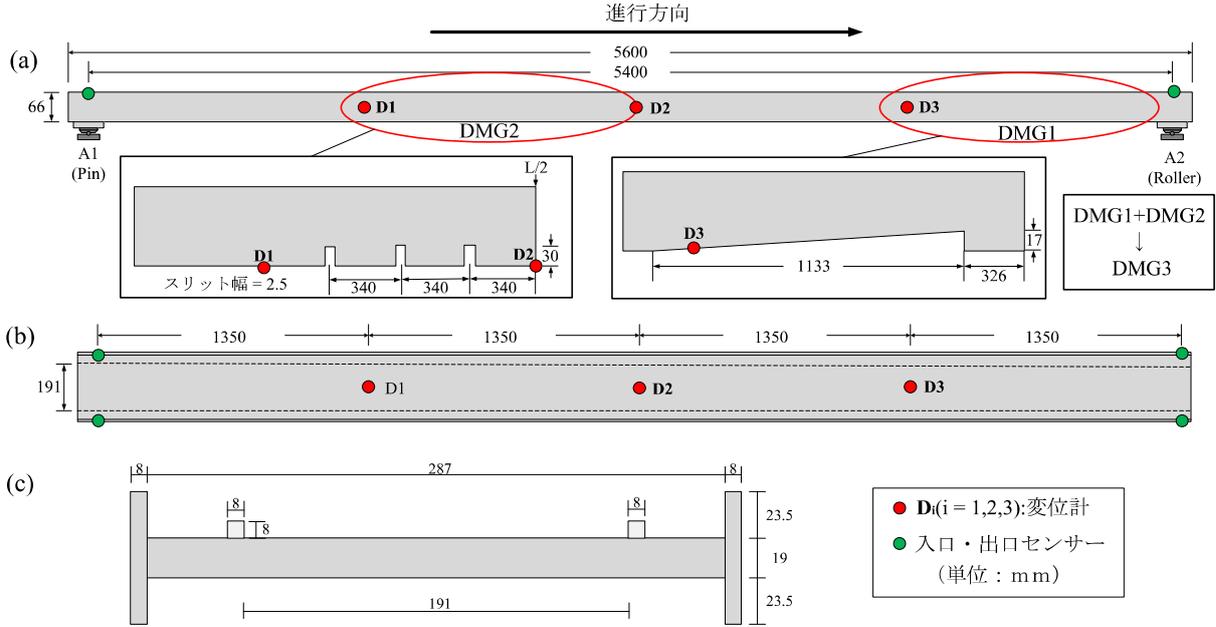


図-2 模型橋梁および損傷位置模式図 (a)立面図, (b)平面図, (c)断面図

また、式(9)の $I_b^T I_m$ を以下のように整理する。

$$I_b^T I_m = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^K l_{bj1} l_{mj1} & \sum_{j=1}^K l_{bj1} l_{mj2} \\ \sum_{j=1}^K l_{bj2} l_{mj1} & \sum_{j=1}^K l_{bj2} l_{mj2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \quad (11)$$

ここで、 l_{mj1} と l_{mj2} はそれぞれ実車軸と仮想車軸による新たに計測された変位応答から得られる j 時刻のたわみ影響線を表す。

式(9)の $I_b^T I_b$ の逆行列は以下の式(12)になる。

$$(I_b^T I_b)^{-1} = \frac{1}{A_{11}A_{22} - A_{12}^2} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(11)と式(12)を式(9)に代入し、同定軸重 \mathbf{P} について整理すると、式(13)が得られる。

$$\mathbf{P} = \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} (P_{m1}B_{11} + P_{m2}B_{12})A_{11} - (P_{m1}B_{21} + P_{m2}B_{22})A_{21} \\ (P_{m1}B_{21} + P_{m2}B_{22})A_{11} - (P_{m1}B_{11} + P_{m2}B_{12})A_{21} \end{bmatrix} \frac{1}{A_{11}A_{22} - A_{12}^2} \quad (13)$$

ここで、 P_{m1} と P_{m2} はそれぞれ実際の軸重と仮想軸重を表す。

仮想軸は本来存在しないもので、式(13)の P_{m2} はゼロとなるが、損傷によってたわみ影響線が基準影響線より大きくなる場合、以下の式(14)に示すように、その増加分がBWIMで同定される仮想軸の軸重に配分される。

$$\mathbf{P} = \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} (P_{m1}B_{11})A_{11} - (P_{m1}B_{21})A_{21} \\ (P_{m1}B_{21})A_{11} - (P_{m1}B_{11})A_{21} \end{bmatrix} \frac{1}{A_{11}A_{22} - A_{12}^2} \quad (14)$$

逆に、損傷によるたわみ影響線の変化がない場合

($I_m = I_b$)には、BWIMで同定される仮想軸の軸重は、理論的にはゼロとなる。すなわち、 $P_2 = 0$ になる。なお、本来は実際の軸重と変化したたわみ影響線は未知であり、変位(D_m)計測のみで、同定軸重が得られることになる。

実際に仮想の軸を実車軸の後方に導入する場合は、図-1(c)のように仮想軸の影響線は実車軸との軸間距離分間隔をあけて、実車軸による影響線より時間軸上で遅らせて配置することになる。また、仮想軸が前方にある場合は時間軸上で早めて配置することになる。損傷のない状態において軸重同定を行うと、本来の軸に軸重が配分されて仮想軸にはほぼゼロの値が配分される。対して損傷のある状態では図-1(d)のように損傷分が仮想軸による影響線に軸重配分されることとなる。

以上のように、本研究はBWIMにおける軸重同定の過程で、仮想の車軸を同定システム行列に導入することで、基準たわみ影響線と損傷によるたわみ影響線が異なる場合に、その差分が仮想軸の軸重として算出されることに着目している。

3. 提案手法の妥当性検証

3.1 模型橋梁損傷実験の概要

(1) 実験および損傷シナリオの概要

前節で示した仮想軸の概念を導入したBWIMの手法の妥当性を検証するため模型橋梁を用いた実験を行う。本研究で対象とする模型橋梁は、図-2(a)に示す全橋長5.6m、支間長5.4m、幅303mmの単純桁橋梁である。模型橋梁は図-2(a)に示すように、人工的な損傷が導入されており、損傷部を補強した橋梁の状態を健全状態(以

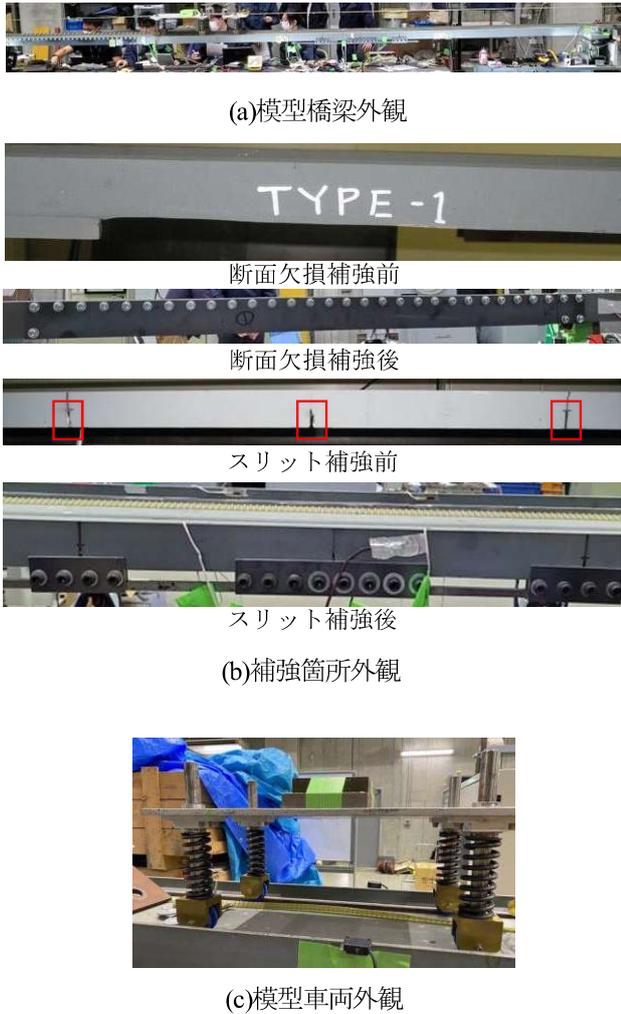


図-3 模型橋梁損傷実験の様子

下 INT) とみなす。なお、支承部については入口側がピン支承、出口側がローラー支承となっている。

損傷シナリオは図-2(a)に示すように、出口側の支承部に近い桁端部における断面部分の欠損による剛性の減少を仮定した損傷（以下 DMG1）と、支間中央付近の入口側にスリットを導入し、剛性の減少を仮定した損傷（以下 DMG2）とその両方を導入した損傷（以下 DMG3）の計 4 シナリオ（INT, DMG1, DMG2, DMG3）において損傷実験を行なった。DMG1 と DMG2 においては対象損傷箇所以外の模擬損傷部分は図-3(b)のように鉄板で挟み込み補強を行っている。

動的载荷実験として、模型車両は図-3(c)に示す総重量 21.9kgf（前軸 10.95kgf, 後軸 10.95kgf）、軸間距離 0.4m の 2 軸車両を用い、走行速度 0.9744m/s で、車両走行実験を実施した。計測箇所は模型橋梁を橋軸方向に 4 分割したその節点となる路面の中央箇所（以下入口側から D1, D2, D3）の計 3 点である。また橋梁入口と出口にもセンサを設置し、車両の進入と退出を検知している。サンプリング周波数は 200Hz とした。

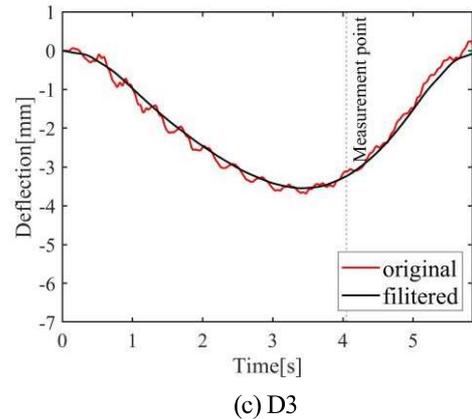
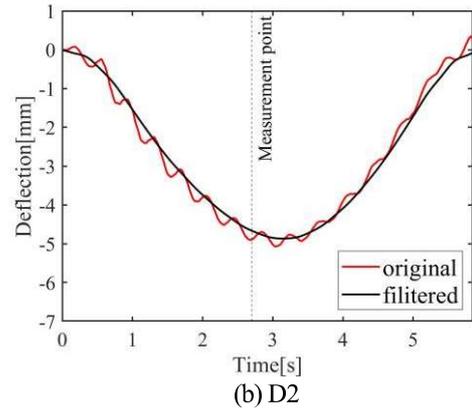
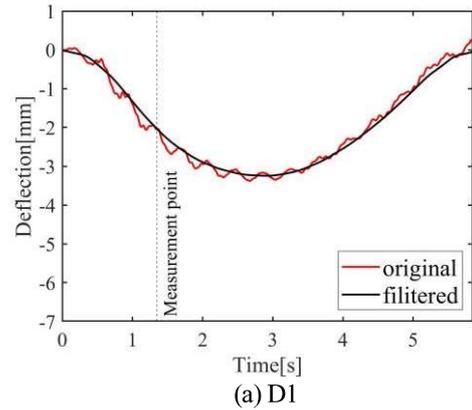


図-4 模型実験の橋梁変位応答

(2) 実測変位応答

各シナリオ（INT, DMG1, DMG2, DMG3）において、10 往路ずつ変位の測定を行った。模型橋梁実験では前処理として、波形形状を崩さない範囲で変位データを平滑化するために 150 点平均による単純移動平均を適用し、入口と出口に設置したセンサをもとに変位応答部分を抽出して平均したものを、各シナリオの実測変位応答として取り扱う。各測定点における実測変位応答を図-4 に示す。

3.2 シミュレーションの概要

(1) シミュレーションモデル概要

3.1 節で示した損傷導入済みの模型橋梁実験では、補強



図-5 シミュレーションモデルの模式図

状態を健全、補強を外した状況を損傷とした比較であるため、局所的な損傷かつ補強を伴わない純粋な損傷に対するたわみ影響線の変化と BWIM の同定結果への影響を明らかにするために、上記の模型橋梁と車両をモデル化し、車両-橋梁連成系の数値シミュレーション¹⁾を用いた妥当性検討を行う。車両-橋梁連成系のシミュレーションに用いるモデルを図-5 に示す。

以降の検討では、模型車両と同等の重量を用い、基準たわみ影響線を取得する。軸重推定に用いる変位応答の算出には、軸重分配の割合が異なる場合の同定結果の影響を確認するため、総重量 30.0kgf (前軸 12.00kgf, 後軸 18.00kgf) の 2 軸車両を用いる。変位の測定箇所は模型橋梁と同様に設定する。

損傷シナリオは、腐食などの損傷による剛性低下を想定し、特定の要素の曲げ剛性を減少することで損傷を模擬する。また、損傷箇所と仮想軸の配置における同定重量分配との関係性を考察するために、損傷の影響を反映しやすい測定箇所付近に損傷を施す。橋梁入口付近の 4 番目の要素に損傷が生じた場合 (以下 DMG1') と橋梁中央付近の 9 番目の要素に損傷が生じた場合 (以下 DMG2')、橋梁出口付近の 13 番目の要素に損傷が生じた場合 (以下 DMG3') の計 4 シナリオ (INT, DMG1', DMG2', DMG3') において損傷シミュレーションを行う。また、損傷の程度の比較として曲げ剛性を 25%減少させた場合 (以下 Case1) と、50%減少させた場合 (以下 Case2) の計 2 ケース (Case1, Case2) で行う。実橋において、腐食により 20~30%の剛性が低下している事例¹⁸⁾があること、2 段階に分けることで変化の傾向を検討できることから、低下率をこのように定めた。

(2) 算出変位応答

車両-橋梁連成系のシミュレーションから得られる変位応答にはノイズは含まれておらず、平滑化の処理として 100 点平均による単純移動平均を適用している。各測定点におけるシミュレーション変位応答を図-6 に示す。

図-6 は模型橋梁の変位との比較を行うために模型橋梁実験で用いた同等の車両による測定点における変位で

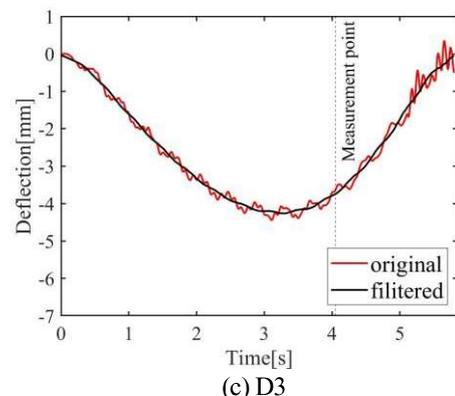
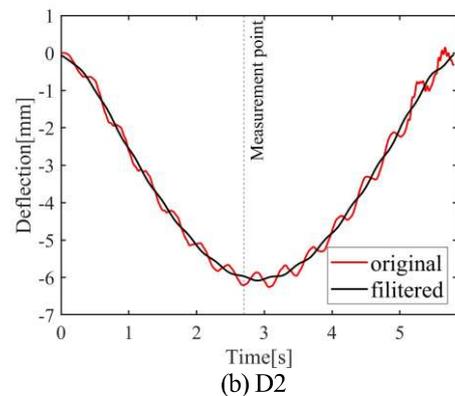
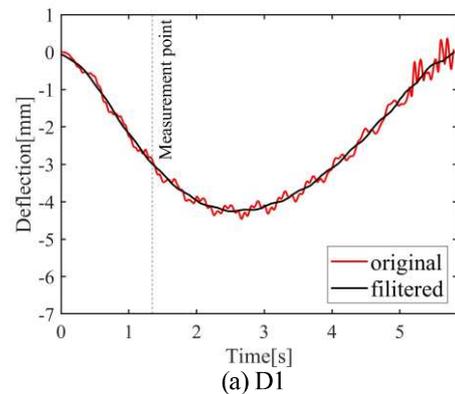


図-6 シミュレーションの橋梁変位応答

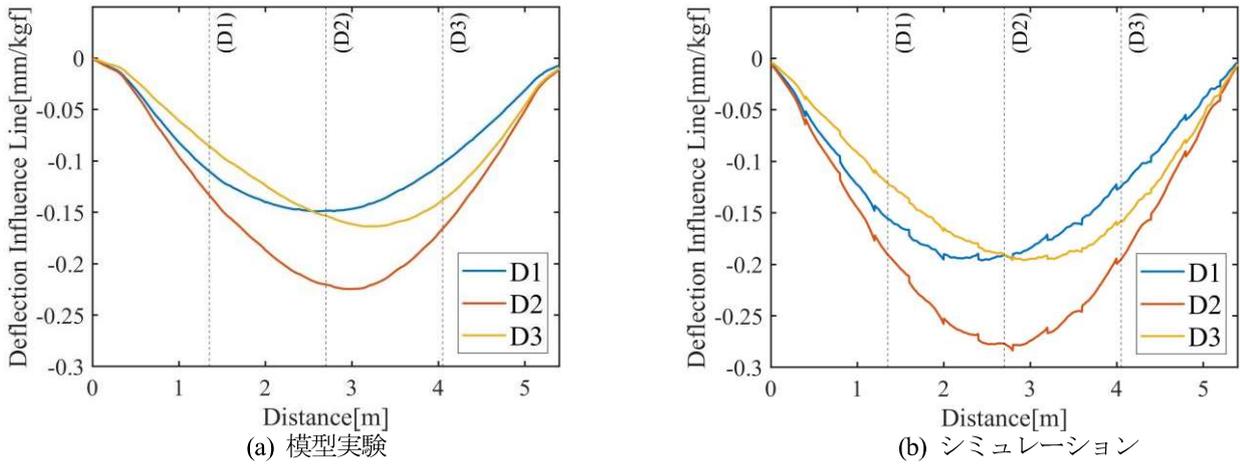


図-7 各測定点におけるたわみ影響線

表-1 模型橋梁実験の橋梁変位を用いた軸重推定結果 (真値：前軸(front)=後軸(rear)=10.95kgf) (単位：kgf)

axle	INT		DMG1		DMG2		DMG3	
	front	rear	front	rear	front	rear	front	rear
D1	10.77	11.05	10.23	12.42	15.54	12.13	14.86	13.04
D2	10.67	11.16	9.95	12.78	16.83	9.89	15.93	11.21
D3	10.61	11.21	9.72	14.02	15.10	9.35	13.80	11.90

表-2 シミュレーションの橋梁変位を用いた軸重推定結果 (真値：前軸(front)=12kgf, 後軸(rear)=18kgf) (単位：kgf)

axle	Case1								Case2					
	INT		DMG1'		DMG2'		DMG3'		DMG1'		DMG2'		DMG3'	
	front	rear												
D1	12.16	17.85	13.58	17.37	12.04	18.98	11.78	18.52	16.43	16.40	11.79	21.23	11.02	19.87
D2	12.13	17.89	12.94	17.50	12.47	18.98	11.66	18.78	14.58	16.74	13.16	21.17	10.73	20.57
D3	12.10	17.92	12.72	17.59	12.82	18.34	11.41	19.53	13.97	16.93	14.27	19.20	10.04	22.77

あり、実験で計測された模型橋梁の変位応答(図-4)に比べて約2割程度大きい結果となった。本シミュレーションは、補強状態や損傷状態を模擬した模型橋梁の完全な再現ではないものの、模型橋梁の設計時の曲げ剛性を当てはめており、2軸車両が通過した際のたわみの形状や全体的な傾向に関しては概ね再現できていると考えられる。再現変位が約2割程度大きい結果となった理由として、模型橋梁実験における健全状態で得られたたわみ影響線から、橋梁が全スパンで同じ断面を持つと仮定して曲げ剛性を算出したところ、シミュレーションで使用する設計時の曲げ剛性の値に比べて約2割程度増大しており、損傷箇所の補強が影響していると考えられる。

(3) 損傷における変化

上記の手法を用いて、模型橋梁とシミュレーションモデルで、各測定箇所算出したたわみ影響線を図-7に示す。たわみ影響線についてもシミュレーションの方が模型実験のたわみ影響線より大きい結果となっているが、傾向としては実験を再現している。

平滑化を施した変位応答から算出したたわみ影響線は漸化式と移動平均の影響により、平滑でない部分も存在する。一方で、たわみ影響線に平滑化を施したことで、後述のBWIMの適用結果において、軸重同定精度の低下がみられた。理由として、平滑でない部分にも情報が残されていると判断し、平滑化を施した変位応答を用いるが、基準となるたわみ影響線には平滑化や他のフィルタを施さずに取り扱う。

たわみ影響線の算出精度と損傷による同定結果の変化を確認するため、算出したたわみ影響線をもとに、模型橋梁実験の各シナリオ(INT, DMG1, DMG2, DMG3)の各測定箇所計測した変位応答を平滑化し、平均したデータでBWIMを適用する。その同定結果を表-1にまとめる。ここでのINT状態の変位応答は、基準たわみ影響線を算出した変位応答と同様の条件下で新たに計測した変位応答を用いている。INT状態では各測定箇所各軸重の推定誤差が±3.2%以内に収まり、精度良く同定されているが、損傷状態においては影響線の変化を考慮し

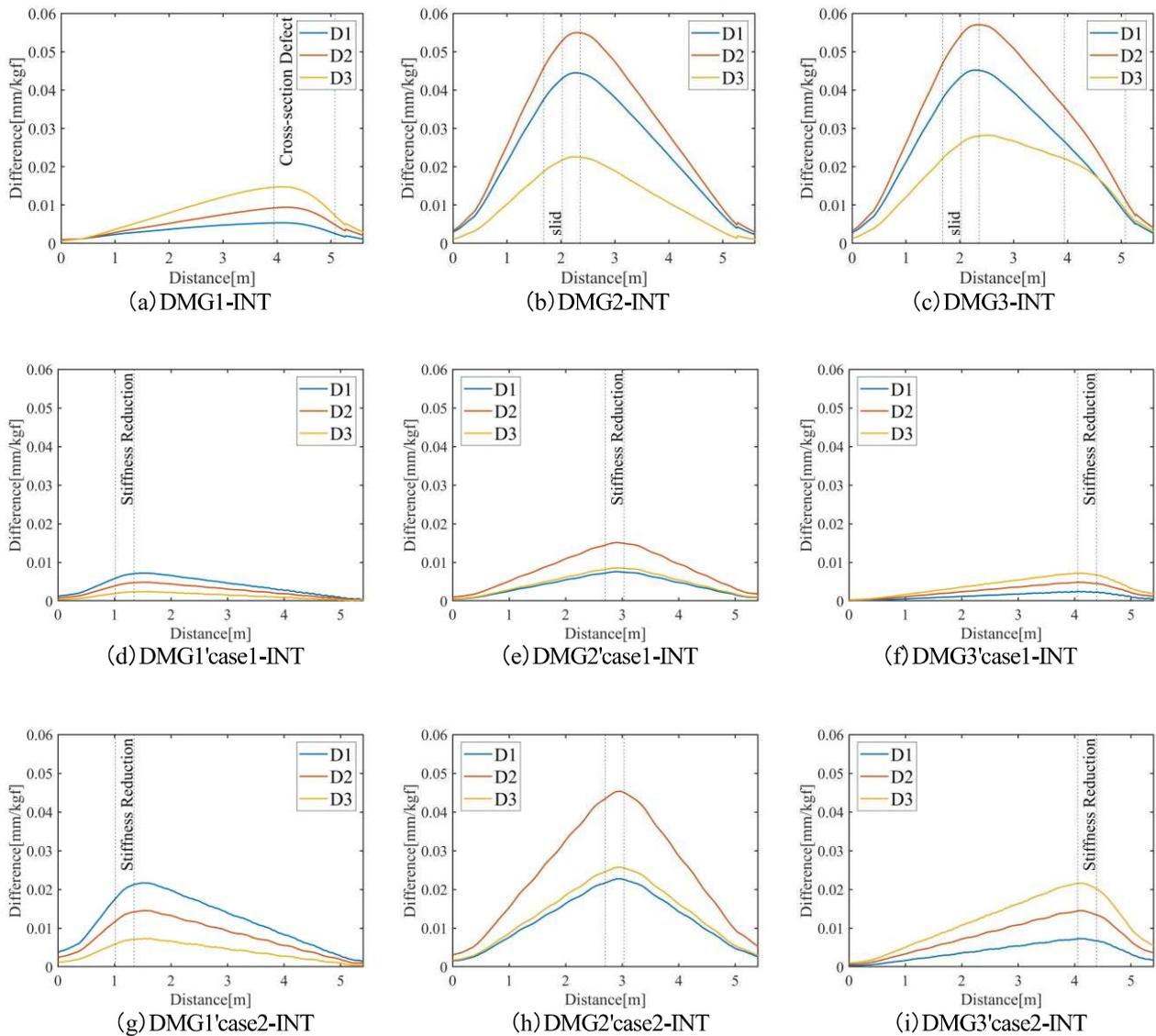


図-8 各損傷状態と健全状態のたわみ影響線の差分

ていないため、各測定箇所実際に軸重の同定誤差が広がり、特に損傷箇所付近の測定箇所ではその誤差が大きくなること分かる。また、損傷が複数個所にまたがると同定誤差も広がることを確認できる。

同様に車両-橋梁連成系のシミュレーションから得られる変位応答を用いて検討を行う。各損傷シナリオ (INT, DMG1', DMG2', DMG3') と各損傷度ケース (Case1, Case2) の各々の測定箇所の変位応答を平滑化したデータで BWIM を適用する。軸重の同定結果を表-2 に示す。表-2 より、INT 状態では各測定箇所各軸重の同定誤差が $\pm 1.3\%$ 以内に収まり精度良く同定されている。また、損傷の度合いが大きくなるほど同定誤差が大きくなることを確認できる。

次に、損傷によってたわみ影響線が変化することを確認する目的で、健全シナリオ (INT) で算出したたわみ影響線と、損傷シナリオ (模型橋梁では DMG1, DMG2, DMG3, シミュレーションでは DMG1', DMG2', DMG3',

Case1, Case2) で算出したたわみ影響線の差分を検討する。たわみ影響線の差分をまとめて図-8 に示す。ただし、変化を見やすくするために平滑化を施している。たわみ影響線の差分から、損傷によってたわみ影響線が変化することが確認できる。損傷付近の測定箇所算出されるたわみ影響線は、他の計測箇所に比べて損傷に伴う変化が顕著であり、損傷の度合いによってたわみ影響線の変化の度合いも異なることが確認できる。また、損傷のたわみ影響線の形状全体に及ぼす影響は、損傷が橋梁の端部付近に位置する場合より中央部分付近に位置する方が大きいことが分かる。

こうしたたわみ影響線の変化を考慮すると、損傷付近で測定する変位を用いて同定する仮想軸の軸重が、他の測定箇所の変位を用いて同定する仮想軸の軸重に比べて大きく分配されるような傾向の違いが確認できれば、損傷箇所の推定にも有効であると考えられる。

表一3 模型橋梁実験の橋梁変位を用いた仮想軸を含む軸重推定結果
(真値：前軸(front) = 後軸(rear) = 10.95kgf) (単位：kgf)

axle	INT			DMG1			DMG2			DMG3		
	front	rear	virtual									
D1	10.91	10.75	0.16	11.12	10.61	0.97	13.46	16.37	-2.28	13.26	16.31	-1.75
D2	10.81	10.86	0.16	10.62	11.43	0.72	15.92	11.74	-0.99	15.48	12.13	-0.49
D3	10.58	11.28	-0.04	9.63	14.20	-0.10	15.50	8.53	0.44	14.09	11.32	0.31

表一4 シミュレーションの橋梁変位を用いた仮想軸を含む軸重推定結果
(真値：前軸(front) = 12kgf, 後軸(rear) = 18kgf) (単位：kgf)

Case1 axle	INT			DMG1'			DMG2'			DMG3'		
	front	rear	virtual	front	rear	virtual	front	rear	virtual	front	rear	virtual
D1	12.44	17.28	0.31	13.13	18.31	-0.51	12.57	17.87	0.60	12.43	17.17	0.74
D2	12.31	17.51	0.21	12.92	17.55	-0.02	12.42	19.09	-0.06	12.23	17.62	0.63
D3	12.28	17.55	0.20	12.80	17.43	0.09	12.75	18.48	-0.08	11.72	18.89	0.35

Case2 axle	DMG1'			DMG2'			DMG3'		
	front	rear	virtual	front	rear	virtual	front	rear	virtual
D1	14.56	20.30	-2.13	13.06	18.60	1.44	12.43	16.93	1.60
D2	14.16	17.60	-0.47	12.97	21.56	-0.21	12.07	17.81	1.49
D3	13.91	17.07	-0.08	14.13	19.47	-0.15	10.67	21.45	0.71

4. 損傷検知の可能性検討

前節で述べた理論を用いて、仮想軸を含んだ BWIM を適用し、仮想軸に割り当てられる軸重値に着目した損傷検知の可能性について検討を行う。検討に用いるデータは、健全シナリオ (INT) から算出した基準たわみ影響線と各損傷シナリオでの変位応答である。車両は2軸車両であり、仮想軸を車両後軸から軸間距離分 0.4m の間隔をあけて配置する。

4.1 模型橋梁車両走行実験による検討

前節で算出したたわみ影響線をもとに、各損傷シナリオ (INT, DMG1, DMG2, DMG3) で計測した D1, D2, D3 観測点の変位応答を平滑化し、平均した変位応答を用いて、仮想軸を含む軸重同定を行う。同定結果を表一3 に示す。INT では、本来なら 0kgf の仮想軸に最大で 0.16kgf が割り当てられる結果となった。各軸重は最大で ±3.1% の誤差内で同定されている。ここで仮想軸の軸重が真値である 0kgf で算出されないのは、影響線による行列 (式 (4) 参照) に仮想軸の影響線を追加することによって $\mathbb{R}^{K \times N}$ の行列が $\mathbb{R}^{K \times (N+1)}$ に変化し、逆問題に疑似逆行列を導入したことによる影響であると推察する。

損傷シナリオでは各測定箇所において、INT 状態に比べて仮想軸に割り当てられる重量の絶対値が大きくなっており、仮想軸の軸重の絶対値の変化から損傷の有無の検知の可能性が確認できる。しかしながら、仮想軸に負の値が割り当てられている同定結果も散見されるほか、

DMG1 では損傷付近の計測点 D1 と D2 の変位を用いて同定した仮想軸の軸重が D3 の変位による同定仮想軸の軸重に比べて大きく割り当てられている。他の損傷シナリオでも D1 の変位を用いて同定した仮想軸の軸重の絶対値が他の測定箇所の変位を用いた同定仮想軸重に比べて大きいことが確認できる。

4.2 車両—橋梁連成系シミュレーションによる検討

損傷による軸重同定への影響を明らかにするために、より局所的な損傷を想定し、特定箇所の剛性を変化させ、車両—橋梁連成系シミュレーションによる検討を行う。損傷箇所は模型橋梁に比べて範囲を限定し、各測定点付近の4番目と9番目と13番目の要素 (図一5 参照) に損傷を導入し、シミュレーションを行う。

シミュレーションから得られる変位応答を基に、損傷シナリオ (INT, DMG1', DMG2', DMG3') と損傷度ケース (Case1, Case2) 別に計測した D1, D2, D3 測定点の変位応答を平滑化し、仮想軸を設けて軸重同定を行う。同定結果を表一4 に示す。INT の仮想軸の同定軸重は 0kgf ではなく、最大 0.31kgf であった。各軸重は最大で ±2.5% の誤差内で同定された。

模型橋梁実験と同様に、INT 状態に比べ、損傷シナリオでの仮想軸に割り当てられる軸重の絶対値が大きい測定箇所も見られるが、割り当てが少ない箇所も散見される。そのほか、D1 においては他の測定箇所に比べて割り当てられた仮想軸の絶対値量が大きいことが見て取れる。また、損傷度ケースごとでは、曲げ剛性の減少率が大きい

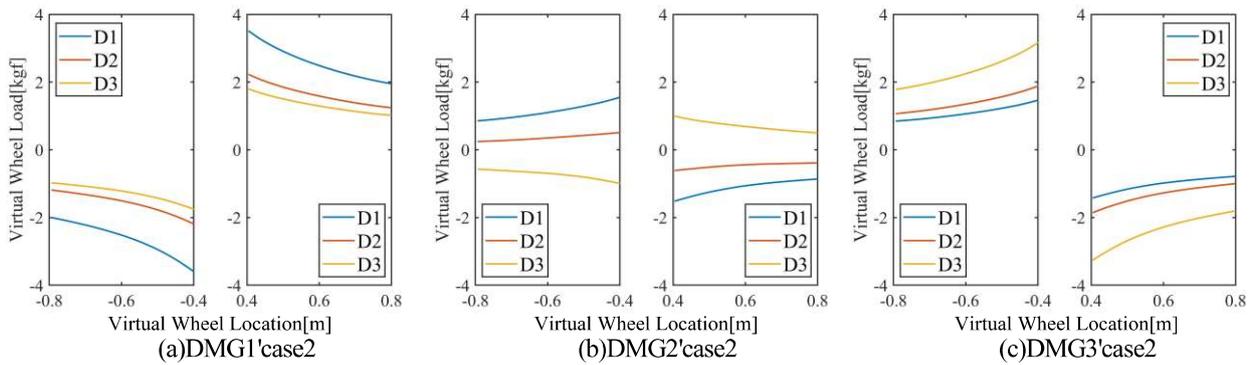


図-9 各測定箇所と各損傷箇所における仮想軸の位置による軸重分配の関係

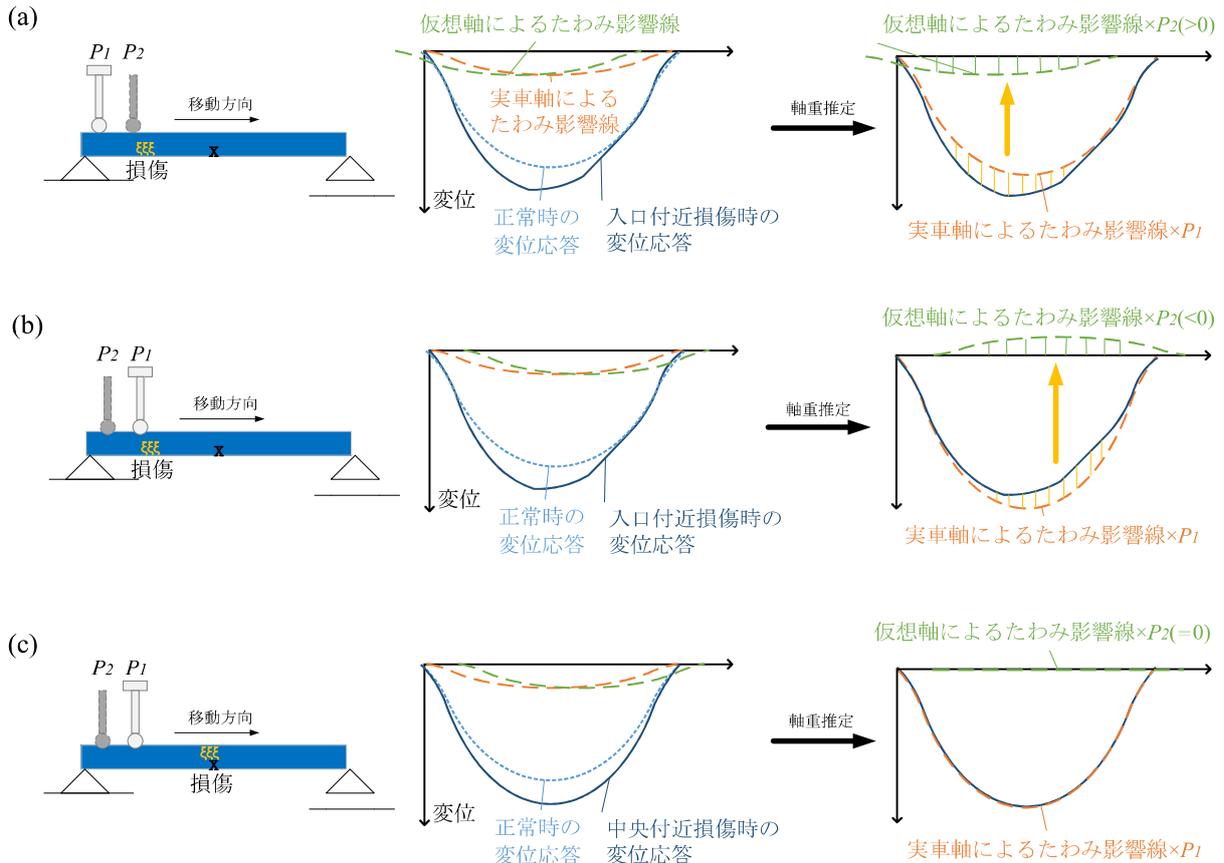


図-10 損傷箇所と軸重分配の関係

(a)入口付近損傷：仮想軸前方配置 (b)入口付近損傷：後方配置 (c)中央付近損傷：後方配置

くなると、仮想軸に割り当てられる軸重の絶対値が大きくなる結果が得られた。このことより、損傷度合いによって仮想軸重も変化することが伺える。ただし、本検討では、仮想軸重の値から損傷の有無を検知するには不十分な結果となった。

5. 精度向上に向けた検討

5.1 単一軸車両による適用結果

車軸数による影響を小さくし、損傷箇所が仮想軸の軸重の割り当てへの影響を明らかにするため、本来は存在しないが1軸における車両を仮定し、仮想軸への割り当

ての検討を行う。図-5のシミュレーションを用いて、軸重30kgfの1軸車両の走行による車両-橋梁連成系の交通振動解析を行う。シミュレーションにより得られる変位応答からたわみ影響線を算出し、仮想軸を様々な箇所に配置して軸重同定を行う。なお、事前検討で観察された傾向として、仮想軸が本来の軸から離れるほど分配される軸重はゼロに近づき、実の車軸に近づくほど軸重が分配されやすくなるため、仮想軸を車軸から前後に0.4~0.8mの範囲内で順々に配置している。

仮想軸の位置と仮想軸への軸重配分との関係をまとめた結果を図-9に示す。図-9の横軸は仮想軸の位置 (Virtual Wheel Location：実車軸からの距離)を、縦軸は仮

表-5 シミュレーションにおける仮想軸最適配置による軸重同定結果
(真値：前軸(front)=12kgf, 後軸(rear)=18kgf) (単位：kgf, optimal は仮想軸の最適位置(m))

Case1	DMG1'				DMG2'				DMG3'			
	axle	front	rear	virtual optimal	front	rear	virtual optimal	front	rear	virtual optimal		
D1	13.50	17.42	0.04	0.64	12.57	17.87	0.60	-0.80	12.43	17.17	0.74	-0.80
D2	12.33	17.83	0.31	0.47	13.14	18.48	-0.24	1.20	12.23	17.62	0.63	-0.80
D3	11.81	18.03	0.50	0.40	12.65	18.43	0.08	0.52	11.82	18.79	0.36	-0.92

Case2	DMG1'				DMG2'				DMG3'			
	axle	front	rear	virtual optimal	front	rear	virtual optimal	front	rear	virtual optimal		
D1	15.83	16.75	0.28	0.58	13.06	18.60	1.44	-0.80	12.43	16.93	1.60	-0.80
D2	12.74	17.63	0.99	0.40	15.18	19.68	-0.71	1.20	12.07	17.81	1.49	-0.80
D3	11.55	18.10	1.32	0.40	14.41	19.11	-0.07	0.53	10.88	21.27	0.71	-0.96

仮想軸に分配された軸重を表す。実車軸からの負の距離は、仮想軸が実車軸の後方に配置されていることを意味する。正の距離は、実車軸の前方に仮想軸が配置されることを意味する。図-9 で特記すべき点は、仮想軸が車両前方にある場合に、損傷が入口付近 (DMG1'case2) にあると正の値として軸重が分配されることに対し、損傷が出口付近 (DMG3'case2) にあると負の値として軸重が分配されることである。仮想軸の配置を車両後方に置くと仮想軸重の値の正負が逆転することが見て取れる。また支間中央付近の損傷 (DMG2'case2) に対しては他の損傷シナリオに比べて仮想軸へ重量が分配されにくいことが分かる。この傾向は損傷度合いが Case1 の場合でも同様の結果が観察された。

5.2 損傷と仮想軸への重量の割り当ての関係

以上のことより損傷と仮想軸への重量の割り当ての関係を考察する。橋梁に損傷が生じる場合は、たわみ影響線が変化し、変位応答にも影響する。特に、測定箇所付近に損傷がみられる場合には、その変位応答およびたわみ影響線の変化が顕著になることが図-8 からも伺える。

橋梁の入口付近に損傷があるシナリオ (DMG1') のシミュレーションによるたわみ影響線の差分 (図-8 (d)と (g)) をみると、測定箇所 D1 付近のたわみ影響線が大きく変化しており、変位応答でも同様の傾向であった。このとき、図-10(a)に示すように、仮想軸 (P_2) の配置が車両前方 (影響線を時間軸上早めて配置する) の場合、軸重同定を行うと変位応答の変化している箇所と仮想軸の影響線の配置箇所が似ることから仮想軸に正の軸重が割り当てられる。これに対して、仮想軸 (P_2) 車両後方配置 (時間軸上遅らせて配置する) の場合、図-10(b)のように変位応答の変化箇所が実車軸に大きく割り当てられてしまい、その超過分に対し、仮想軸の影響線が負の値として割り当てられる。これが仮想軸に割り当てられる重量の正負、および損傷箇所と仮想軸の配置箇所の関係を示していると推察する。

また、中央箇所の損傷に対して仮想軸に割り当てられにくい理由として、図-10(c)のように中央箇所の損傷は変位応答全体の形状に大きく影響し、軸重推定を行うと本来の軸に損傷分が割り当てられやすく、軸間距離分ずらして配置している仮想軸の影響線にはほとんど割り当てられないことが考えられる。

以上の考察を踏まえて、損傷によるたわみ影響線の変化に伴う同定重量の超過分を仮想軸として抽出するにあたり、損傷が橋梁入口側にある場合には仮想軸を車両前方に配置し、損傷が橋梁出口側にある場合には仮想軸を車両後方に配置する必要がある。次節では、損傷の影響が仮想軸に反映されるような仮想軸配置を考察する。

5.3 最適仮想軸配置

(1) 最適仮想軸配置の提案

上節の損傷による変位応答の変化部分と仮想軸の影響線の配置の関係性をもとに、4章の模型実験とシミュレーションから得られる変位応答を用いて2軸車両に設けた仮想軸の位置を変化させながら、損傷による影響線の変化分が仮想軸に正の軸重として分配される最適仮想軸配置の探索を行う。

仮想軸に負の軸重が割り当てられるケースを除外するために、推定される各軸重の二乗和が最小となる仮想軸の配置箇所を探索し、その箇所を最適仮想軸配置として検討を行った。

(2) 適用結果

損傷位置が局所的である車両-橋梁連成系のシミュレーションモデルを用いて、同様の条件の下、各損傷シナリオで実車軸から 0.4~0.8m 離れた範囲で仮想軸を順々に配置し、各配置で BWIM による軸重同定を行った。その結果を表-5 に示す。

入口および出口付近における損傷シナリオ (DMG1', DMG3') において、各測定箇所探索を行うと、最適配置 (optimal) が DMG1'では車両前方に集中し DMG3'では車両後方に集中して置かれた。また、仮想軸の軸重も

表-6 実測変位応答における仮想軸最適配置による軸重同定結果
(真値：前軸(front) = 後軸(rear) = 10.95kgf) (単位：kgf, optimal は仮想軸の最適位置(m))

axle	DMG1				DMG2				DMG3			
	front	rear	virtual	optimal	front	rear	virtual	optimal	front	rear	virtual	optimal
D1	11.04	10.80	0.86	-0.80	14.53	12.70	0.46	0.40	14.02	13.55	0.36	0.53
D2	10.67	11.38	0.73	-0.80	13.85	11.46	1.49	0.40	13.39	12.53	1.29	0.40
D3	10.11	13.36	0.28	-0.83	11.22	11.32	2.02	0.40	11.53	13.04	1.20	0.40

全ての測定箇所では正の値として分配されている。また、損傷付近の計測点から離れた測定箇所 (DMG1'の D2, DMG3'の D2) では、損傷による同定重量の超過分が Case1 では DMG1'が 69%, DMG3'が 143%の割合で、Case2 では DMG1'が 75%, DMG3'が 115%の割合で仮想軸重として抽出された。

支間中央付近に損傷が位置する損傷シナリオ (DMG2') に関しては、変位測定箇所ごとに最適配置は異なり、最適とされる仮想軸配置でも負の仮想軸重の結果が出ていた。しかしながら、図-5 に示すように、DMG2'は微小ながら出口側に寄った損傷である。DMG2'シナリオの損傷部から離れた計測点 D1 の変位による仮想軸の同定軸重を見てみると、仮想軸最適配置が車両後方であり、仮想軸の軸重が正の値を示している。これは DMG3'で D1 の変位による同定仮想軸の軸重に似た傾向である。また、損傷による同定重量の超過分が Case1 では 60%の割合で、Case2 では 48%の割合で抽出されており、損傷箇所が中央付近にある場合でも仮想軸の軸重を正の値として抽出できるケースが確認された。

以上の結果より、仮想軸への軸重の割り当ておよび仮想軸の最適配置箇所の示す傾向から損傷箇所の推定および検知の可能性が挙げられる。また、推定した損傷箇所から離れた測定箇所では仮想軸配置を探索する事で、損傷による重量の変化分の仮想軸への割り当てを正の値として抽出し、その値から損傷の検知を検討できる可能性がある。

また、最適仮想軸配置の検討を、模型橋梁実験の実測変位応答を用いても行った。その結果を表-6 に示す。各測定箇所では仮想軸重が正の値で得られたほか、損傷箇所から離れた測定箇所 (DMG1 の D1, DMG2 の D3) では同定重量の超過分が 114%, 79%の割合で抽出されていた。これに対して、複数箇所に損傷がある DMG3 のシナリオでは、正の仮想軸重は同定されるものの同定軸重の超過分が D1 で 6%, D2 で 25%, D3 で 32%の割合でしか割り当てられず、損傷に対して精度良く抽出されなかった。シミュレーションモデルは、損傷が局所的にある状態で検討を行っていたが、複数にまたがるような損傷状態では現状の検討では、精度の高い抽出は難しいと考えられる。

6. 結論

本研究では、橋梁の損傷によるたわみ影響線の変化分を BWIM による軸重同定の過程で抽出することを目的として、単純桁の模型橋梁における損傷実験と、局所的な損傷での適用を検討するためのシミュレーションによる検討を行った。損傷導入済みの模型橋梁実験では、補強状態を健全、補強を外した状況を損傷とした比較を通じて、補強による模型橋梁の重量の若干の変化はあるものの、活荷重変位に着目し、変位計測による BWIM を用いた橋梁の異常検知法の妥当性を検証した。シミュレーションでは、間接的ではあるものの、純粋な損傷有無における考察を行った。たわみ影響線は損傷箇所とその度合いに応じて変化することが確認され、車両後方に仮想軸を導入して軸重推定を行うと、健全状態に比べて損傷状態では仮想軸への軸重の割り当てられる量の絶対値が大きくなる事象が観測でき、異常の有無の検知の可能性があると云える。

また、損傷箇所と仮想軸の配置箇所が軸重分配に及ぼす影響を考慮し、最適仮想軸配置を検討した。最適とされる仮想軸の配置箇所と仮想軸に分配された正の軸重との検討から、橋梁の損傷および損傷箇所を検知できる可能性を見出した。一方、損傷が複数箇所にまたがっている場合や中央箇所に損傷がある場合は抽出の精度が下がる結果となった。これは荷重や損傷が全体的に影響を及ぼすたわみ影響線の形状による影響が原因である可能性が高い。

今後の検討課題として、損傷箇所と軸重分配に関する傾向を考察し、理論構築を進めるほか、損傷箇所や損傷度合いがたわみ影響線の形状に及ぼす影響、仮想軸への軸重分配に及ぼす影響についても考察を深めていきたいと考えている。加えて、本検討では軸間距離や速度も既知のものとして考察を行ったが、誤差が含まれる場合に軸重同定に与える影響を推察し、仮想軸への軸重分配が主にたわみ影響線の変化に依るものであることを検証していくことが求められる。

実践的な適用に向けては、同定精度の向上、動画情報と組み合わせた橋梁の異常検知と多軸車両や異なる構造形式における適用性について検討が必要である。

参考文献

- 1) 国土交通省：道路メンテナンス年報，2020
- 2) 道路橋定期点検要領，国土交通省道路局，2019.
- 3) 吉岡勉，伊藤信，山口宏樹，松本泰尚：鋼トラス橋の斜材振動連成とモード減衰変化を利用した構造健全度評価，土木学会論文集 A, Vol. 66, No. 3, pp.516-534, 2010.
- 4) 三木千壽，山口浩，判治剛，田辺篤史：無線センサネットワークによる鋼橋部材の疲労損傷原因の特定の試み，構造工学論文集, Vol. 56A, pp.671-679, 2010.
- 5) 宮本文穂，矢部明人，工藤靖之：橋梁ヘルスマニタリングシステムのための新しい損傷検知手法の開発，構造工学論文集, Vol. 57A, pp.655-668, 2011.
- 6) 金哲佑，北内壮太郎，杉浦邦征，川谷充郎，甲斐正義：多径間連続鋼トラス橋の交通振動を用いた損傷検知手法，土木学会論文集 A1, Vol.69, No.3, pp.557-571, 2013.
- 7) Zhang F., Kim C. W., and Goi Y.: Efficient Bayesian FFT method for damage detection using ambient vibration data with consideration of uncertainty, *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 28, Iss.2, e2659, 2021.
- 8) 志岐和久，伊藤幸広，石橋考治，内田慎哉，松田浩，出水亨，木村嘉富：正方形マーカーを用いた橋梁のたわみ計測法，*実験力学*, Vol. 12, No. 4, pp.375-382, 2012.
- 9) 今井道男，太田雅彦，露木健一郎，今井浩，三浦悟，村田一仁，高田巡：高速撮影動画を用いたデジタル画像相関法によるコンクリート構造物の動的挙動把握，土木学会論文集 A1, Vol. 72, No. 1, pp.279-289, 2016.
- 10) 齊藤隆仁，實成優馬，小林基成，池田大造，牧祐之，横山広，平山博，金哲佑，榎谷浩，宇津徳浩：動画像解析による変位量を用いた橋梁支承部の機能評価に関する検討，土木学会第 75 回年次学術講演会，概要集 I-345, 2020.
- 11) 関屋英彦，横関耕一，木村健太郎，小西拓洋，三木千壽：橋梁の加速度記録を用いた変位応答算出法の提案，土木学会論文集 A1, Vol. 72, No. 1, pp.61-74, 2016.
- 12) 小塩達也，Eugene O'Brien, Susan Taylor：PC 桁橋における非接触 Bridge Weigh-in-Motion の試み，構造工学論文集, Vol. 65A, pp.600-606, 2019.
- 13) 関屋英彦，小西拓洋，木ノ本剛，三木千壽：MEMS 加速度センサを用いた変位計測に基づく Portable-Weigh-In-Motion システムの提案，土木学会論文集 A1, Vol. 72, No. 3, pp.364-379, 2016.
- 14) Moses, F.: Weigh-in-motion system using instrumented bridges. *Transportation Engineering Journal (ASCE)*, Vol. 105, pp.233-249, 1979.
- 15) 館石和雄，竹之内博之，三木千壽：鋼橋部材交差部に生じる局部応力の発生メカニズムと要因分析，土木学会論文集，No.507/I-30, pp.109-119, 1995.
- 16) E. O'Brien, M. Quilligan and R. Karoumi: Calculating an influence line from direct measurements. *Proceedings of the Institute of civil Engineers, Bridge Engineering*, Vol.159, No.1, pp.31-34, 2006.
- 17) McGetrick P.J., Kim C.W., Gonzalez A. and E. O'Brien: Experimental validation of a drive-by stiffness identification method for bridge monitoring, *Structural Health Monitoring*, Vol.14, No.4, pp.317-331, 2015.
- 18) 日本鋼構造協会：鋼構造物の耐用性調査報告，道路橋編，JSSC，Vol. 8, No. 84, pp.6-26, 1972.

(2021年9月14日受付)

(2022年2月1日受理)