

段階的に損傷を与えた鋼鈑桁橋の振動計測と有限要素解析

Vibration Measurement and Finite Element Analysis of a Sequencely Damaged Steel Girder Bridge

玉田和也*, 宮下剛**, 劉翠平***, 岩崎英徳****, 長井正嗣*****

Kazuya Tamada, Takeshi Miyashita, Cuiping Liu, Hidenori Iwasaki, Masatsugu Nagai

*工博, 舞鶴工業高等専門学校・教授, 建設システム工学科(〒625-8511 京都府舞鶴市宇白屋 234)

**工博, 長岡技術科学大学・特任講師, 産学融合トップランナー養成センター
(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

***工博, 長岡技術科学大学・産学連携研究員, 産学融合トップランナー養成センター
(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

**** 工修, 京都府中丹東土木事務所・室長 企画調整室(〒623-0012 京都府綾部市川糸町丁 畠 10-2)

*****工博, 長岡技術科学大学・教授, 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

The objective of this study is to understand the relationship between damage and the change of dynamic characteristics in an existing bridge for vibration-based structural health monitoring. Focused bridge is a demolished pedestrian bridge, which is a composite steel girder with two main girders. The first damages are slits by gas cutting, which are given to a lower flange in the lateral direction. Then, outstanding plate in the lower flange is removed along the span. Vibration measurement was carried out in each damage case. As a result, it was confirmed that natural frequencies decreased depending on the progress of damage. Its reduction rate was greater in the modes without torsion. For reproducible analysis, analysis using spectral element method and finite element analysis were conducted. Analytical results also showed the similar reduction of natural frequencies to measurement.

Key Words: Vibration, Bridge, Damage, Dynamic characteristics

1. はじめに

周知の通り, 橋梁の老朽化が急速に進行しており, 定量的かつ効率的な維持管理手法の創出が強く求められている¹⁾. この中, 振動計測から同定される固有振動数や振動モード形などの動特性の変化に着目して, 橋梁の健全性診断や損傷検出を行うことを目的とした研究が積極的に行われている²⁾.

ここでは, 実橋梁における損傷と動特性変化の相関関係を把握することが必要であると考えられる. しかし, この相関関係に関する実測データが非常に少ない状況にある. 実橋梁に損傷を与えながら振動計測を実施して, 動特性の変化が確認された研究としては, 文献 3)~6) がある. これらの研究から, 確かに, 実橋梁に損傷を与え

ることで動特性に変化が生じることが分かる.

しかし, 文献 3)~6) では, 損傷を与える箇所が数箇所のみであり, 段階的に与える損傷のケースも最大で 5 ケースと少ない. そのため, 損傷と動特性の相関関係が体系的に把握されているとは言い難い. また, 既往の研究では, 計測対象とする橋梁もコンクリート橋が多い. 文献 3) では, 計測対象を鋼橋としているものの, 加速度計の設置位置を腹板上としている. 実橋梁の維持管理において, 腹板に加速度計を設置する場合には, 移動足場が必要となることもあるため, 実務への適用を考えると床板上に加速度計を設置することが望ましい.

そこで, 本研究では, 鋼橋を対象として, 既往の研究よりも段階的に与える損傷ケースを増やし, 実橋梁における損傷と動特性変化の相関関係を体系的に把握するこ



図-1 計測対象橋梁

とを目的にする。また、加速度計の設置位置も設置が容易な床板上とする。さらに、計測結果の再現解析として、有限要素解析(以下、FEA)による解析的検討を行う。

2. 計測概要

2.1 対象橋梁

計測対象とした橋梁は、京都府舞鶴市の与保呂川に架かる大宮橋の下流側側道橋(歩道橋)である(図-1)。この橋は、大宮橋の拡幅工事に伴い、架け替えられることとなった。構造形式は単純活荷重合成 2 主鋼板桁橋である。桁長は 28.4m、支間長は 27.9m、総幅員は 3.3m、竣工年は 1985 年である。支承は線支承で、西側が固定、東側が可動となっている。

なお、振動計測時には、大宮橋の上流側半分の 2 車線は架け替え工事が終了しており、供用されていた。一方、大宮橋の下流側半分の 2 車線と下流側側道橋は通行止めとなっていた。振動計測を実施した日時は、2010 年 9 月 9 日～11 日の 8 時半～17 時である。

2.2 センサ配置

橋面上のアスファルト舗装を取り除いた後、14 台のサーボ型加速度計(RION・LS-40C)を主桁直上の RC 床板上に設置した。センサの設置間隔は、支間長に対して等分割とした。そして、次節で説明する各損傷ケースに対して、常時微動による振動の鉛直成分を計測した。サンプリング周波数は 200Hz、計測時間は各損傷ケースに対して常時微動では約 20 分間である。

2.3 損傷ケース

図-2 と表-1 に基づいて、橋梁に与えた損傷ケースについて説明する。損傷の与え方は、まず大きく分けると 2 種類に分類される。そのそれぞれを損傷シリーズ 1、損傷シリーズ 2 と名付ける。

損傷シリーズ 1 では、下流側に位置する主桁の下フラ

ンジ自由突出板に、ガス切断によるスリットを桁外側に向けて与える(図-3)。スリットの幅は約 10mm であり、ガス切断により発生するのろを除去して、完全に縁を切った。次に、この損傷を与える順序について説明する。まず、主桁の両桁端部にスリットを与えた(損傷ケース 1 と 2)。これは、実橋梁では桁端部で損傷が多く見られるためである。そして、添接板を避けるように図-2 に示す間隔で、西から東に向けてスリットを与えていった。ただし、損傷ケース 9 では 3 箇所のスリットを損傷ケース 8 では 2 箇所のスリットを時間的な制約からまとめて与えることとした。本シリーズの損傷ケースの総数は 16 ケースとなる。

損傷シリーズ 2 では、腐食による断面欠損を想定して、下フランジの自由突出板を切除することにした。損傷シリーズ 1 で与えたスリット間に、腹板の溶接線に沿ってガス切断による新しいスリットを与えた(図-4)。ただし、作業の安全性の観点から、自由突出板を完全には切断していない。自由突出板の腹板との結合長さは約 100mm とした。ここでも、ガス切断により発生するのろを除去して、完全に縁切りをしている。本シリーズの損傷ケースの総数は 16 ケースとなる。

以上より、本研究では、総計 32 の損傷ケースを対象橋梁に対して段階的に与え、その都度、常時微動による振動を計測することとした。なお、橋梁に対して損傷を与える前に、応力照査を実施して、構造ならびに作業の安全性に問題がないことを確認している。また、本計測では、橋体の温度計測を実施していない。そのため、表-1 には温度変化の目安として、気象庁舞鶴観測所で、計測時に観測された気温を示している。

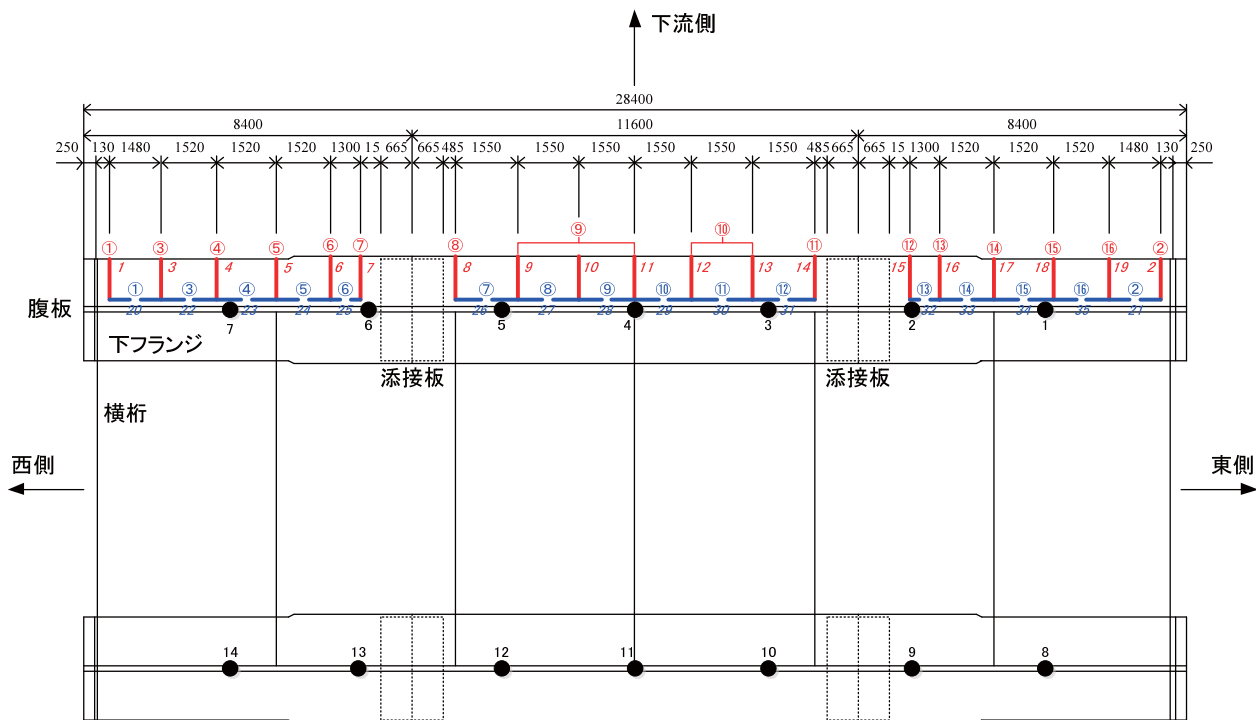


図-2 センサ配置と損傷位置
(ブロック体数字: センサ番号, 斜体数字: 損傷番号, 丸数字: 損傷ケース)

表-1 損傷ケース

損傷 番号	損傷 シリーズ	損傷 ケース	損傷位置/区間 ¹⁾ (mm)	計測日	計測終了 時刻	気温 ²⁾ (℃)	備考	損傷 番号	損傷 シリーズ	損傷 ケース	損傷位置/区間 ¹⁾ (mm)	計測日	計測終了 時刻	気温 ²⁾ (℃)	備考
0	-	-	-	2010年 9月9日	8:37	26.8	損傷なし	20	2	①	130 ~ 1,610	2010年 9月10日	10:27	28.4	下流側主桁下フランジ 外側自由突出板の切除 (ただし、完全には 切断しない)
1	1	①	130		11:28	28.3	下流側主桁下フランジ 外側自由突出板への ガススリット	21		②	26,290 ~ 27,770		11:39	30.1	
2		②	27,770		12:05	27.9		22		③	1,610 ~ 3,130		12:39	32.2	
3		③	1,610		13:12	28.9		23		④	3,130 ~ 4,650		13:30	32.5	
4		④	3,130		13:28	28.9		24		⑤	4,650 ~ 6,170		14:13	32.4	
5		⑤	4,650		13:48	29.3		25		⑥	6,170 ~ 7,470		14:48	31.7	
6		⑥	6,170		14:06	29.1		26		⑦	9,300 ~ 10,850		15:32	31.2	
7		⑦	7,470		14:25	28.8		27		⑧	10,850 ~ 12,400	2010年 9月11日	16:19	30.0	
8		⑧	9,300		14:44	28.4		28		⑨	12,400 ~ 13,950		16:59	29.3	
9			10,850					29		⑩	13,950 ~ 15,500		9:11	28.5	
10		⑨	12,400		15:14	28.2		30		⑪	15,500 ~ 17,050		10:12	31.7	
11			13,950					31		⑫	17,050 ~ 18,600		10:53	32.8	
12		⑩	15,500		15:38	28.6		32		⑬	20,430 ~ 21,730		11:49	34.2	
13			17,050					33		⑭	21,730 ~ 23,250		13:28	31.9	
14		⑪	18,600		15:57	27.9		34		⑮	23,250 ~ 24,770		14:04	32.6	
15		⑫	20,430		16:13	28.0		35		⑯	24,700 ~ 26,290		14:54	31.0	
16		⑬	21,730	2010年 9月10日	16:32	27.7									
17		⑭	23,250		8:57	25.1									
18		⑮	24,770		9:12	26.1									
19		⑯	26,290		9:26	26.7									

1) 西側固定支承からの距離
2) JMA舞鶴



図-3 ガス切断によるスリット (損傷シリーズ 1)



図-4 下フランジの切除 (損傷シリーズ 2)

3. 計測結果

3.1 動特性の同定

本論文では、同定された動特性を統計的に把握するために、各ケースについて常時微動の 100 秒間のデータを 10 秒間ずつオーバーラップさせながら切出してデータセットを作成することとした。各ケースのデータセットの総数は約 20 セットとなる。

動特性の同定では、NExT-ERA 法^{7,8)}を利用した。NExT 法において、相互相関関数を求める際の参照点は図-2 の計測点 2 とした。ここで、参照点に対しては自己相関関数を求めた。そして、NExT 法から作成された自由振動波形を十分に減衰する範囲として 90 秒間を抽出し、ERA 法への入力とした。このとき、ハンケルマトリクスのサイズは、 $(15001 \times 14 \text{ 点}) = 210,014 \times 3,001$ となる。図-5 に、損傷を与える前のケースで同定された代表的な振動モード形を示す。

3.3 損傷と動特性の関係

(1) 固有振動数の変化

図-6 に、損傷ケースに対する各振動モードの固有振動数の変化を示す。ここで、図-6 の横軸は表-1 の損傷番号であり、縦軸の f_{n0} と f_{nd} はそれぞれ損傷を与える前後での n 次の固有振動数を表し、固有振動数の変化率となる。

図-6 から、以下のことが分かる。

- 固有振動数は損傷が進行するにつれて減少し、その変化率は損傷シリーズ 2 の方が大きい。
- しかし、図中には、損傷を与えているにも関わらず、固有振動数が増加する部分がある。この理由については後述する。
- 固有振動数の変化率は、ねじれを伴わないモードの方が大きい。これは、下フランジに与えた損傷が、床板、下横構を含む擬似箱断面のねじり剛性に対して大きな影響を与えないことに起因する。
- 損傷と固有振動数の変化率の相関は、3 次(反対称 1 次)モードが高い。これは、このモードが励起されやすいことによるものと考えられる。

次に、損傷と固有振動数の変化率の相関が高い 3 次モードに着目して、データの詳細分析を行う。図-7 に、図-6 に示した 3 次モードの推移を $\pm 1\sigma$ (標準偏差) の範囲と合わせて示すとともに、気象庁舞鶴観測所での気温データも参考値として示す。図-7 から、以下のことが分かる。

- 下フランジの自由突出板を完全に切除した損傷シリーズ 2 の後、固有振動数は、損傷を与える前と比較して約 8.2% 低下した。
- 図-7 には、損傷を与えているにも関わらず、固有振動数が最大で約 0.03Hz と僅かに増加する部分がある。これは、計測日の変更に伴い見受けられる。計測開始時刻の気温は、前日の計測終了時の気温よりも低くなっているため、固有振動数の増加は、気温の低下が要因の一つとして考えられる^{4,9)}。その他の要因として、対象橋梁の近傍を走行する車両による振動の影響、計測と解析精度の影響などが考えられるものの、原因の特定には至っていない。

(2) 減衰比と振動モード形の変化

損傷の推移と減衰比の変化には相関が見られなかった。また、損傷に起因する振動モード形の明確な変化も確認されなかった。

4. FEA による解析的検討

4.1 解析概要

対象橋梁の FEA モデルの作成では、主桁、横桁、横構、地覆を含む RC 床板、支点部のソールプレート、主桁と横桁の連結板をモデル化することとした。ただし、振動計測時にアスファルト舗装は取り除かれていたため、このモデル化は行わない。また、計測時に高欄は撤去されていたものの、事前検討から動特性に与える影響が小さかったことからそのモデル化をしなかった。さらに、主桁高さについては、その高さを上フランジ側で凸となる放物線(3.2%パラボラ)で厳密にモデル化した。モデルの作成ならびに FEA の実行は、汎用有限要素解析ソフトウェア Diana 9.3¹⁰⁾を用いた。

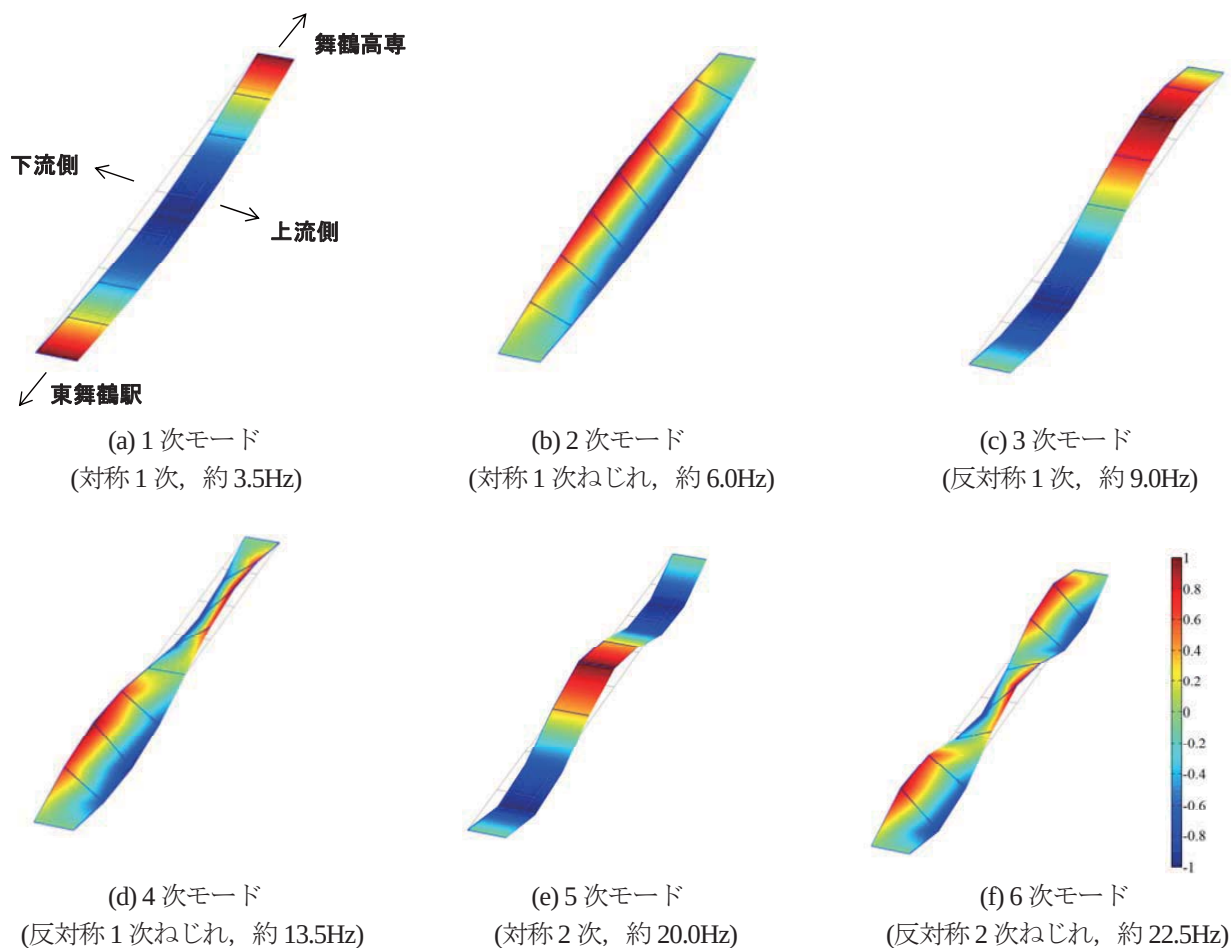


図-5 同定された代表的な固有振動モード形

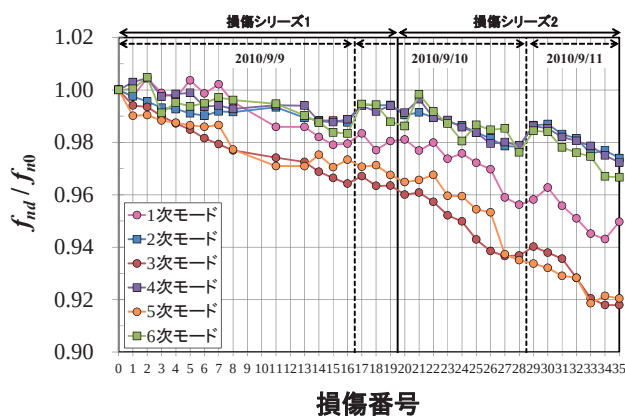


図-6 損傷に対する固有振動数の低下率

(○: ねじれを伴わないモード, □: ねじれを伴うモード)

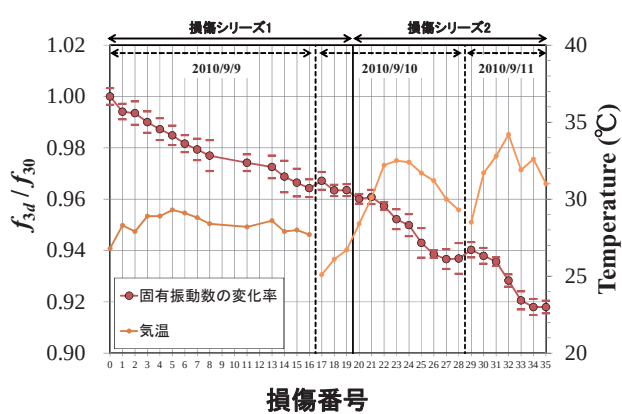


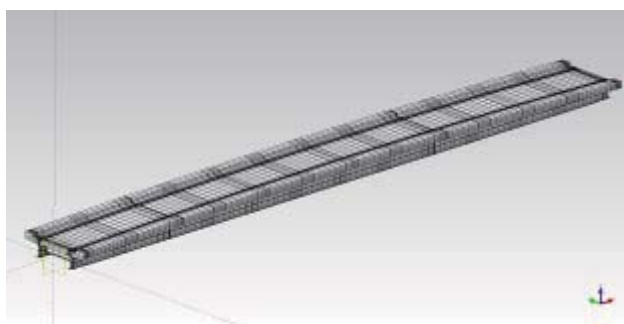
図-7 3 次モードの固有振動数の低下率

全体を構成する要素は、主桁、垂直補剛材、横桁、主桁と横桁の連結板を 4 節点シェル要素(Q20SH), RC 床板を 8 節点ソリッド要素(HX24L), 横構をトラス要素(L2TRU)とする。主桁上フランジと床板の連結は、対象橋梁が合成桁であることから、シェル要素とソリッド要素の節点を共有させることでモデル化する。以上から作成された FEA モデルを図-8 に示す。モデルの節点数は 44,643、要素数は 40,302 である。

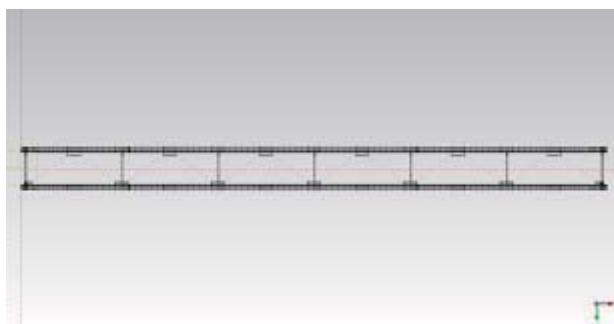
各部材の FEA で用いた物性値を表-2 に示す。コンクリ

ートの弾性係数は、建造時の設計計算書において設計基準強度を 30 N/mm^2 としていたことから決定した¹¹⁾。また、コンクリートの質量密度は、建造時のコンクリート強度試験結果や鉄筋材料表などから計算して決定した。

境界条件は、図-9 に示すように支点部補剛材と下フランジの共有節点に対して線状に、実橋梁の支持条件を反映した固定-可動支持のケースと常時微動下の状況を想定して可動支持が固着した固定-固定支持のケース



(a) 全体モデル



(b) 床組

図-8 FEA モデル

表-2 材料諸元

部材	材種	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比	質量密度 (kg/m ³)
上フランジ	SM50YA	2.00×10 ⁵	0.300	7,850
	SM50YB			
腹板	SM50YA			
下フランジ	SM50YB			
	SM53B			
垂直補剛材	SS41			
横桁				
横構				
ソールプレート	SM41A			
床板	コンクリート	2.80×10 ⁴	0.167	2,300
地覆				

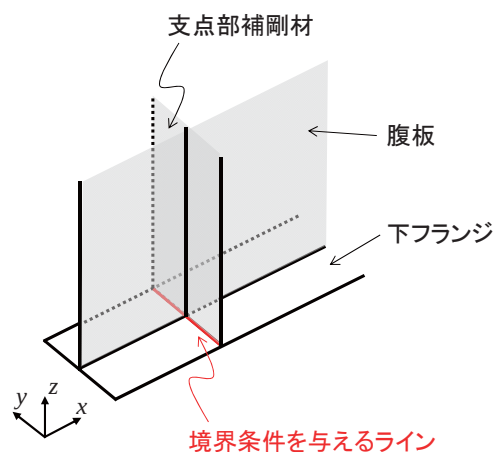


図-9 FEA モデルで境界条件を与える位置

表-3 FEA の予備解析結果

モード 次数	振動モード	固有振動数 (Hz)								
		計測結果			解析結果					
					境界条件: 固定-可動			境界条件: 固定-固定		
		損傷前	損傷後 ¹⁾	低下率 (%)	損傷前	損傷後 ¹⁾	低下率 (%)	損傷前	損傷後 ¹⁾	低下率 (%)
1	対称1次	3.568	3.388	5.0	2.50	2.23	10.8	4.06	3.86	7.6
2	対称1次ねじれ	6.104	5.945	2.6	6.18	6.02	2.6	6.33	6.33	1.7
3	逆対称1次	9.162	8.410	8.2	8.84	7.25	18.0	8.84	8.18	10.7
4	逆対称1次ねじれ	13.691	13.312	2.8	14.10	13.45	4.6	14.70	14.45	4.1
5	対称2次	20.165	18.561	8.0	17.89	15.96	10.8	20.85	19.24	10.1
6	対称2次ねじれ	22.581	21.829	3.3	22.03	22.07	-0.2	24.48	22.04	4.5

1) 下フランジ自由突出板の片側を全スパンにわたり添接板を除いて切除した場合 (損傷番号35)

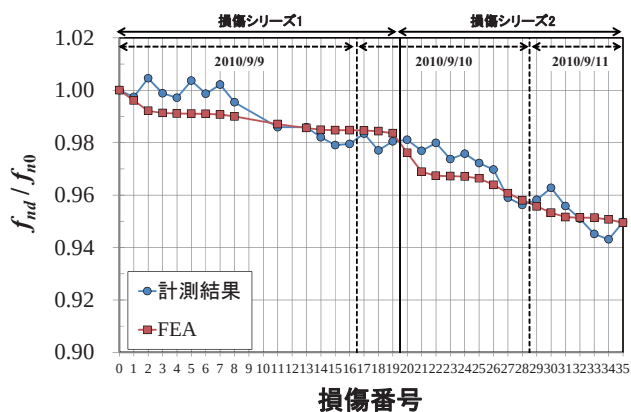
について検討することとした。可動支持では x 方向の並進成分と y 方向の回転成分を自由とし、固定支持では y 方向の回転成分のみを自由としている。その他の並進成分と回転成分は拘束した。

以下では、まず、境界条件が固有値解析の結果に与える影響を実測結果との比較を通じて検討する。次に、実橋梁に与えた損傷ケースを FEA モデルに与えて、固有値解析を行う。FEA における固有値解析のアルゴリズム

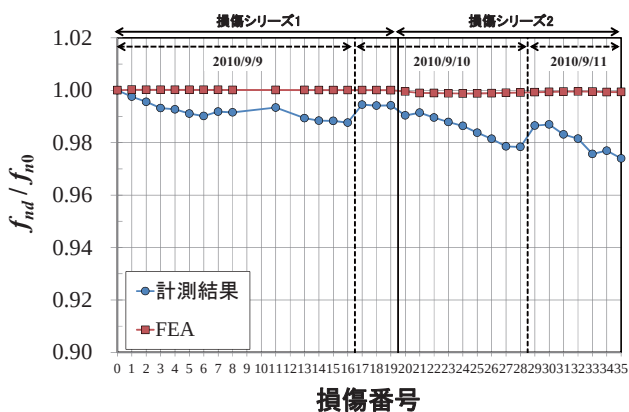
は、サブスペース法である。

4.2 予備解析

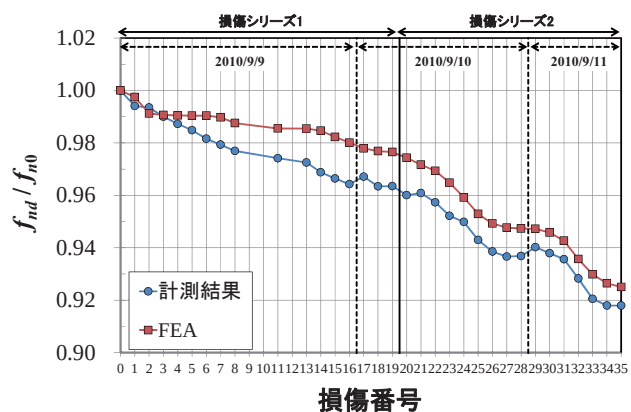
ここでは、FEA モデルの境界条件のみを変更して、計測結果を再現し得る FEA モデルの同定を行うこととする。FEA モデルの境界条件を固定-可動支持としたケースと固定-固定支持したケースの固有値解析結果を表-3 に示す。どちらのケースでも固有値解析から得られる振動モード形の現れ方は、計測結果と同様であった。また、



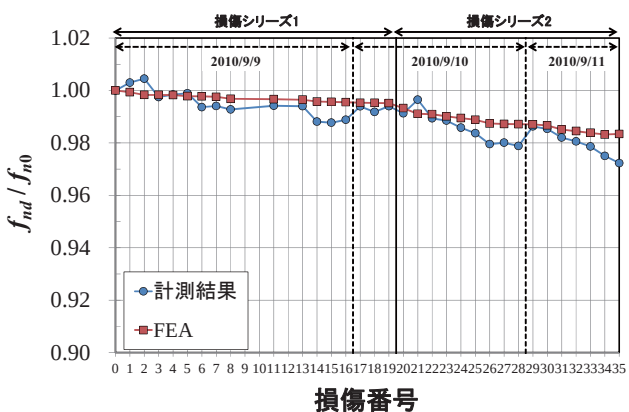
(a) 1次モード (対称1次)



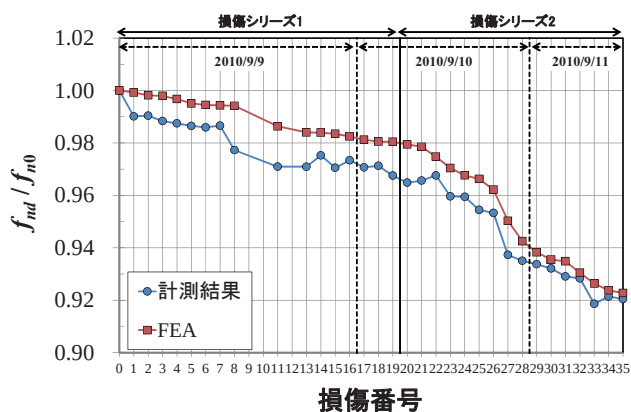
(b) 2次モード (対称1次ねじれ)



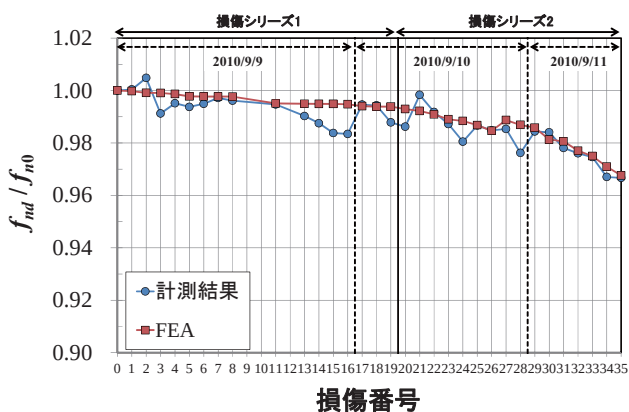
(c) 3次モード (反対称1次)



(d) 4次モード (反対称1次ねじれ)



(e) 5次モード (対称2次)



(f) 6次モード (反対称2次ねじれ)

図-10 計測結果と FEA の比較 (損傷に対する固有振動数の低下率)

表-3には、下フランジ自由突出板の片側を全スパンにわたり添接板を除いて切除した場合(表-1の損傷番号35)の結果も示している。

表-3から、FEAモデルの境界条件を固定-固定支持としたケースでは、計測結果と比較して、全ての振動モードの固有振動数が2Hz以下の差となっており、また固有振動数の低下率も計測結果に近いことがわかる。これは、常時微動下では、橋梁に作用する振動振幅が小さいため、実際には可動支承が橋軸方向に動かないためと考えられる。

以上より、FEAは計測結果と完全には一致していないものの、固有振動数の相対変化を見るため許容することとし、以下の解析では、FEAモデルの境界条件を固定-固定支持として解析を進める。

4.3 損傷と固有振動数の関係

図-10に、損傷ケースに対する各振動モードの固有振動数の変化率を計測結果と合わせて示す。図-10から、前章の解析結果同様に、FEAでもねじれを伴う振動モードでは固有振動数の低減率が小さく、ねじれを伴わない

振動モードでは固有振動数の低減率が大きくなっており、両者の傾向が概ね一致していることが確認される。以上より、本研究の振動計測から同定された固有振動数の変化は、有意なものと言える。

5. まとめ

本研究では、実橋梁における損傷と動特性変化の相関関係を体系的に把握することを目的として、撤去される歩道橋に対して、段階的に損傷を与えながら振動計測を実施した。対象とした橋梁の形式は2主鋼桁橋であり、片側の主桁に対して、その下フランジの自由突出板に、ガス切断によるスリットを順番に与えた(損傷シリーズ1)。次いで、スリット間の自由突出板を逐次切除することとした(損傷シリーズ2)。与えた損傷ケースの総数は32である。また、計測結果の再現解析として、有限要素法による解析的検討を行った。以下に、本研究から得られた知見をまとめる。

- ・ 損傷と固有振動数の変化率の相関は、3次(反対称1次)モードが高く、損傷を与える前後で、約8.2%低下した。
- ・ 固有振動数の変化率は、ねじれを伴わないモードの方が大きくなった。これは、下フランジに与えた損傷が、床板、下横構を含む擬似箱断面のねじり剛性に対して大きな影響を与えないためである。
- ・ 損傷を与えているにも関わらず、固有振動数が僅かに増加する部分が見られた。これは、気温の低下が要因の一つとして考えられる。その他の要因として、対象橋梁の近傍を走行する車両による振動の影響、計測と解析精度の影響などが考えられるものの、原因の特定には至っていない。
- ・ 損傷の推移と減衰比の変化には相関が見られなかった。また、損傷に起因する振動モード形の明確な変化も確認されなかった。
- ・ 対象橋梁の詳細なFEAモデルを作成して、実橋梁に与えた損傷と同一の損傷を与え、固有値解析を実施した。この際、境界条件として、支点部補剛材と下フランジの共有節点に対して線状に、固定-可動支持のケースと固定-固定支持のケースについて検討した。その結果、固定-固定支持のケースの方が、計測結果に近い結果を与えた。これは、常時微動下では、橋梁に作用する振動振幅が小さいため、可動支承が実際には橋軸方向に動かないためと考えられる。
- ・ 計測結果と同様に、FEAでもねじれを伴う振動モードでは固有振動数の低減率が小さく、ねじれを伴わない振動モードでは固有振動数の低減率が大きくなり、両者の傾向が概ね一致した。以上より、本研究の振動計測から同定された固有振動数の変化は、有意なものと言える。

謝辞

本研究の振動計測では、長岡技術科学大学ならびに舞鶴工業高等専門学校に学生諸子に多大なる協力を受けました。また、本研究の一部を平成22年度「高専-長岡技科大連携教育研究の推進」による研究助成、文部科学省「テニユアトラック普及・定着事業」、科学研究補助金・若手(B)で実施しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：道路橋の予防保全に向けた提言，2008。
- 2) Boller C., Chang F. K. and Fujino Y. (Editors): Encyclopedia of Structural Health Monitoring, Wiley, 2009.
- 3) Farrar C. R., Baker W. E., Bell T. M., Cone K. M., Darling T. W., Duffey T. A., Eklund A., Migliori A.: Dynamic characterization and damage detection in the I-40 bridge over the Rio Grande, Los Alamos National Laboratory, Technical Report LA-12767-MS, 1994.
- 4) Peeters B. and De Roeck G.: One-year monitoring of the Z24-Bridge: environmental effects versus damage events, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.30, pp.149-171, 2001.
- 5) Siringoringo D. M., Nagayama T. and Fujino Y.: Dynamic characteristics of an overpass bridge during destructive test, I-425, 土木学会第64回年次学術講演会概要集，2009。
- 6) 田中宏昌，関雅樹，下村勝，中野聡：ラーメン高架橋の健全度に関わる柱の剛性評価法の研究，構造工学論文集，Vol.47A，pp.1019-1028，2001。
- 7) Farrar C.R. and James III G. H.: System identification from ambient vibration measurements on a bridge, Journal of sound and vibration, Vol.205, No.1, p.1-18, 1997.
- 8) Juang J. N. and Pappa R. S.: An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction, Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol.8, No.5, pp.620-627, 1985.
- 9) Sohn H., Dzonczyk M., Straser E. G., Kiremidjian A. S., Law K. H. and Meng T.: An experimental study of temperature effect on modal parameters of the Alamosa Canyon Bridge, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.28, pp.879-897, 1999.
- 10) de Witte F. C. and Kikstra W.P.: DIANA Finite Element User's Manual: Analysis Procedures (release 9.3), TNO DIANA b.v., 2008.
- 11) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編，II 鋼橋編，丸善，2003。