

モード形状の変化に基づく鋼橋の損傷位置同定に関する基礎的検討

Basic study on damage localization of steel bridges based on the changes of the mode shapes

北見工業大学 学生員 ○高祖伸幸 (Nobuyuki Kouso)
北見工業大学 正会員 宮森保紀 (Yasunori Miyamori)
北見工業大学 正会員 山崎智之 (Tomoyuki Yamazaki)
北見工業大学 正会員 三上修一 (Shuichi Mikami)
北見工業大学 F 会員 大島俊之 (Toshiyuki Oshima)

1. はじめに

既設橋梁において供用年数が 50 年を超える橋梁が増加しており、今後莫大な維持管理・更新費が必要となる¹⁾。しかしながら公共投資額は縮小しているうえ、人間による目視点検では効率性や客観性に欠けることが懸念される。そこで、構造物の実時間的な健全性の監視を目指した「構造ヘルスマモニタリング (SHM)」の関心が高まっている。SHM では振動応答を利用した構造同定手法により、過去の振動特性と現状の振動特性を比較することで損傷を評価する方法が研究されている^{2)~4)}。これにより構造物の健全状態や残存寿命を的確に評価でき、構造物に対し迅速な補修・補強を行うことができれば非常に有効である。

振動モニタリングにより損傷の前後で構造特性の違いを評価する研究として、高振動数で起振可能なアクチュエータを用いて損傷の推定をする研究^{5)~6)}が報告されている。これらの研究では、損傷の有無の検出、損傷の位置に関して検討されているが、損傷の早期発見は課題として残っている。構造物の劣化の初期段階は接合部など、外部からの目視が難しく最初は構造全体に大きな影響を与えない箇所の損傷であるため、微小な損傷を早期に発見することこそが、SHM に期待されているともいえる。この場合、損傷の程度よりも位置を精度良く検出することが重要と考えられる。

そこで、本研究では損傷の位置、大きさをモード形状の振幅から評価できる損傷同定手法を提案する。構造物の振動モードの振幅に着目し、一部の部材の板厚減少を腐食や亀裂の損傷とみなし評価を行うことを目的とした。具体的には、小規模な鉄道廃線橋梁を対象に鋼構造部材の FEM モデルを作成する。解析モデルに対して非減衰固有振動解析により固有振動数、モード形状を健全状態、主桁の板厚減少時、横桁の板厚減少時、部材接合部の板厚減少時でそれぞれ計算する。次に健全状態に対する板厚減少時の振幅差をモード形状ごとに求め、絶対値を合計する。計算結果から、モード形状の変化による微小な損傷位置を検出することができたので、結果を報告する。

2. 対象橋梁の概要

本研究で対象とする橋梁は鉄道廃線橋梁である旧ちほく高原鉄道の岩尾川橋梁 (図-1) を選定した。本橋は主桁 2 本、横桁 2 本より構成され、支間長は約 2.4m である。主桁は木材 (古枕木) の上にある丸鋼 4 本で支持さ



図-1 岩尾川橋梁

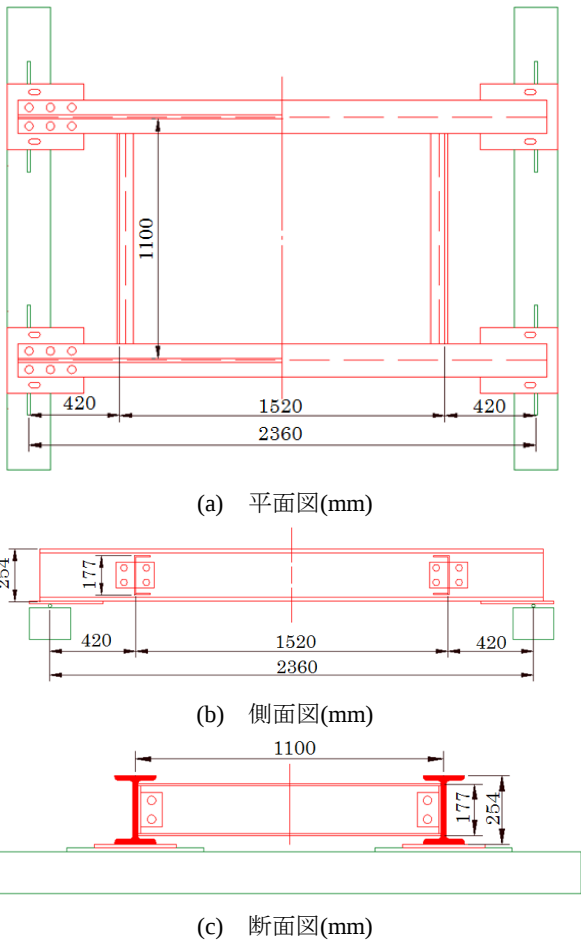


図-2 一般図

表-1 供試体の材料特性

ヤング率 (kN/m ²)	せん断弾性係数 (kN/m ²)	ポアソン比	重量密度 (kN/m ³)
2.0×10 ⁸	7.7×10 ⁷	0.3	7.7×10

れている(図-2)。

FEM 解析を行うため 3 次元構造解析プログラムである TDAPⅢを用いる。対象橋梁の材料特性は表-1 に示す。対象橋梁の主桁は I 形鋼、横桁は溝形鋼であり、簡略化のため主桁は図-3(a)、横桁は図-3(b)の寸法で、梁要素としてモデル化した。節点と要素は図-4 のように設定した。節点は数字、要素は丸数字(本文中では()で表記)で示す。節点 1、13、14、26 は支点である。並進方向の変位はすべて拘束されており、回転は Y 軸周りのみ自由である。以上のモデルに対して非減衰固有振動解析を行いモード形状を 1000Hz まで出力したものが図-5 である。この供試体の状態を健全状態とし、損傷した時に節点の振幅の変化を検討する。

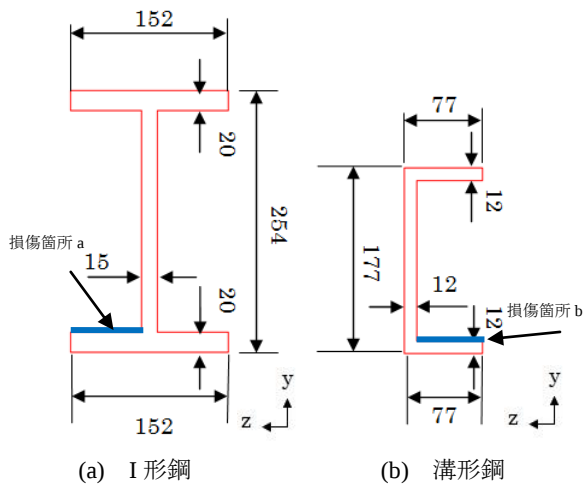


図-3 簡略化した形鋼の寸法 (単位 mm)

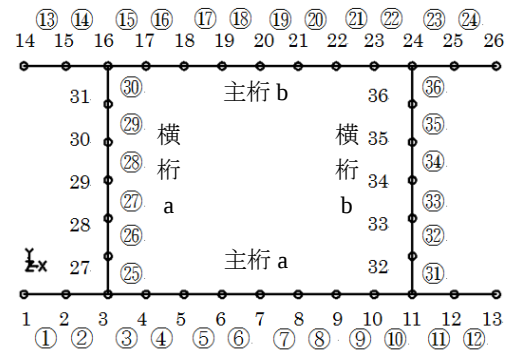


図-4 節点番号と要素番号 (数字は節点、丸数字は要素)

表-2 I 形鋼の断面積と断面 2 次モーメント

板厚減少	主桁		
	断面積 $\times 10^3(\text{mm}^2)$	断面 2 次モーメント $\times 10^6(\text{mm}^4)$	
		y 軸周り	z 軸周り
なし	9.3	95.7	11.8
1mm	9.2	94.9	11.6
6mm	8.9	90.5	10.9
10mm	8.6	86.4	10.2
12mm	8.5	84.2	9.9
20mm	7.9	73.6	8.4

表-3 溝形鋼の断面積と断面 2 次モーメント

板厚減少	主桁		
	断面積 $\times 10^3(\text{mm}^2)$	断面 2 次モーメント $\times 10^6(\text{mm}^4)$	
		y 軸周り	z 軸周り
なし	3.7	16.2	1.9
1mm	3.6	15.8	1.9
6mm	3.3	13.4	1.6
12mm	2.9	9.4	1.1

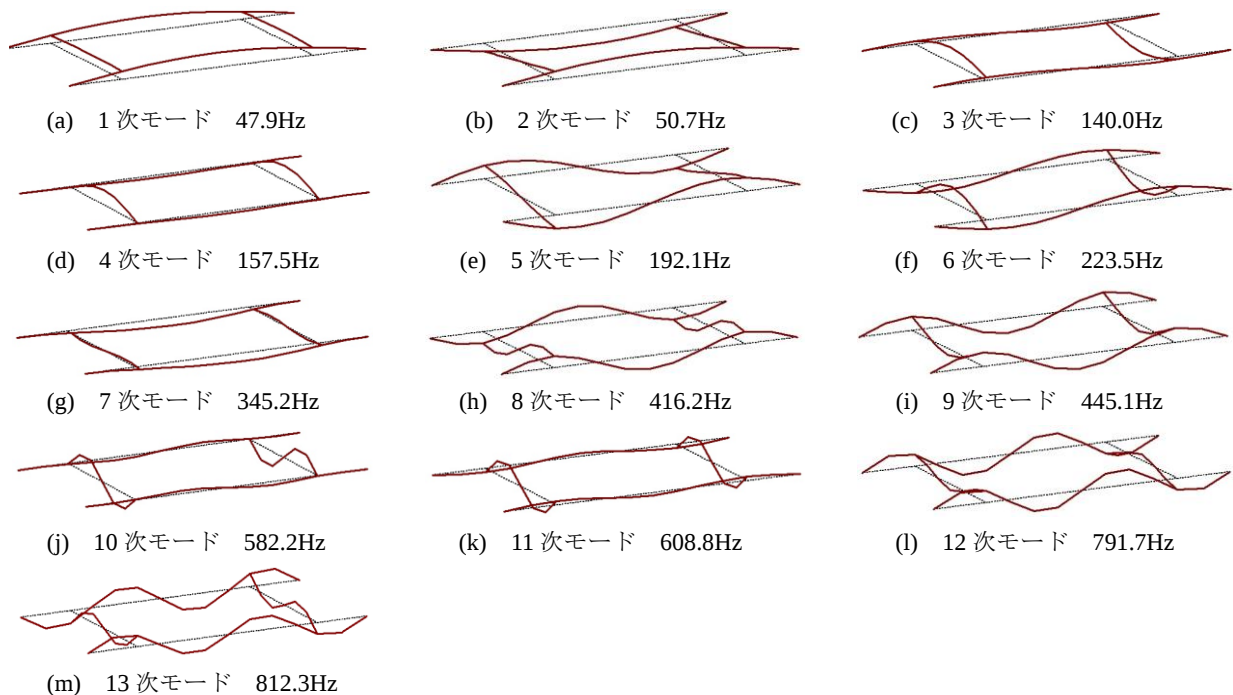


図-5 健全状態のモード形状と固有振動数

3. 損傷時の解析モデルとモード振幅変化量の計算方法

損傷は腐食や亀裂による部材の板厚減少として解析を行う。基礎的検討としてパターン A：図-4 の主桁 a の要素(6)が板厚減少した場合、パターン B：図-4 の横桁 a の要素(27)が板厚減少した場合、について検討した上でパターン C：外部からの目視が難しく腐食しやすい要素(3)、(25)が板厚減少した場合を検討する。パターン A は図-3(a)の損傷箇所 a で示す下フランジの一部が板厚減少した場合を考慮する。板厚減少の厚さは 1mm、10mm、20mm (板厚なし) とし I 形鋼の断面積と断面 2 次モーメントを表-2 のように求めた。これを要素(6)にのみ適用する。パターン B は図-3(b)の損傷箇所 b で示す下フランジが板厚減少した場合を考慮する。板厚が 12mm のため板厚減少の厚さは 1mm、6mm、12mm (板厚なし) とし溝形鋼の断面積と断面 2 次モーメントを表-3 のように求める。これを要素(27)にのみ適用する。パターン C は図-3(a)の損傷箇所 a の板厚減少と図-3(b)の損傷箇所 b が同時に板厚減少した場合を考慮する。横桁の板厚が主桁よりも小さいため、板厚減少の厚さは 1mm、6mm、12mm (横桁の板厚なし) とし I 形鋼、溝形鋼でそれぞれ断面積と断面 2 次モーメントを求めた。主桁は要素(3)、横桁は要素(25)に適用する。

板厚減少の要素を推定するために健全時の各節点のモード振幅 ϕ に対し、板厚減少時を ϕ_d 、モード次数を k として、板厚減少 n mm に対して次式のように損傷指標 d_n を求めた。

$$d_n = \sum_{k=1}^{13} |\phi_k - \phi_{dk}| \quad (1)$$

この計算を板厚減少の解析パターンごとに行うこととした。計算した 36 節点のうち最も大きい値を 1 とし、他の節点を最大値に対する比で図-6 から図-8 に図示した。

4. 板厚減少に対する解析結果

図-6 にパターン A の結果を、図-7 にパターン B の結果を、図-8 にパターン C の結果を示す。横軸が節点番号と要素番号であり縦軸が無次元化した d_n を表している。主桁 a は節点 1 から 13、要素(1)から(12)まで、主桁 b は節点 14 から 26、要素(13)から(24)まで、横桁 a は節点 27 から 31、要素(25)から(30)まで、横桁 b は節点 32 から 36、要素(31)から(36)までとなっている。節点 1、13、14、26 は支点部分であり振動しないためゼロとなる。

4.1 パターン A：要素(6)が板厚減少した時の解析結果

図-6 は要素(6)が板厚減少した結果である。要素(6)の両端である節点 6、7 の d_n は大きい値を示している。節点 6 は 1mm、10mm、20mm すべての板厚減少で d_n が最大値を示す。この理由は要素(6)が断面 2 次モーメントの減少によりたわみやすいことが考えられる。節点 7 の d_n は節点 8 の d_n に比べて板厚減少 1mm、10mm では大きい板厚減少 20mm では節点 8 の方が大きい。また、損傷がない主桁 b においても、板厚減少が大きくなるにつれて、 d_n が大きくなっている。

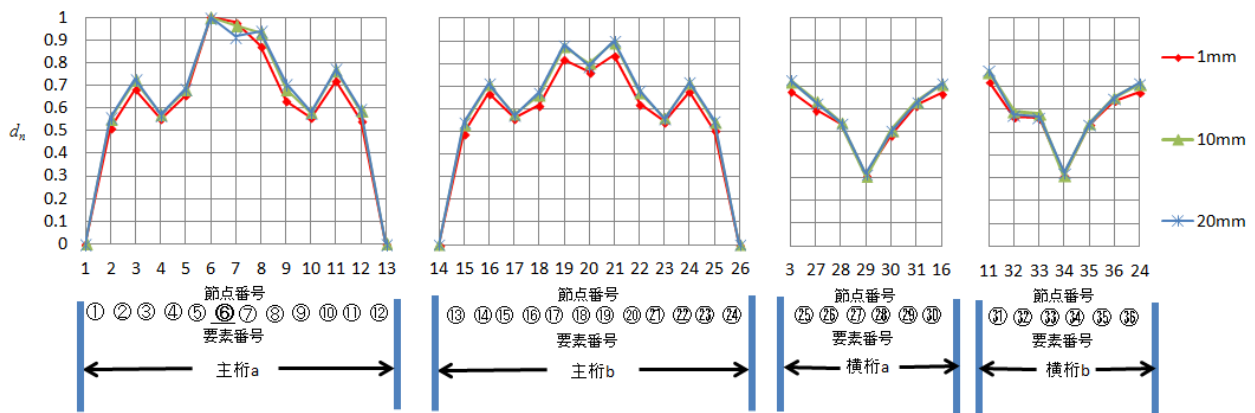


図-6 パターン A：要素(6)が板厚減少した時の損傷指標 d_n

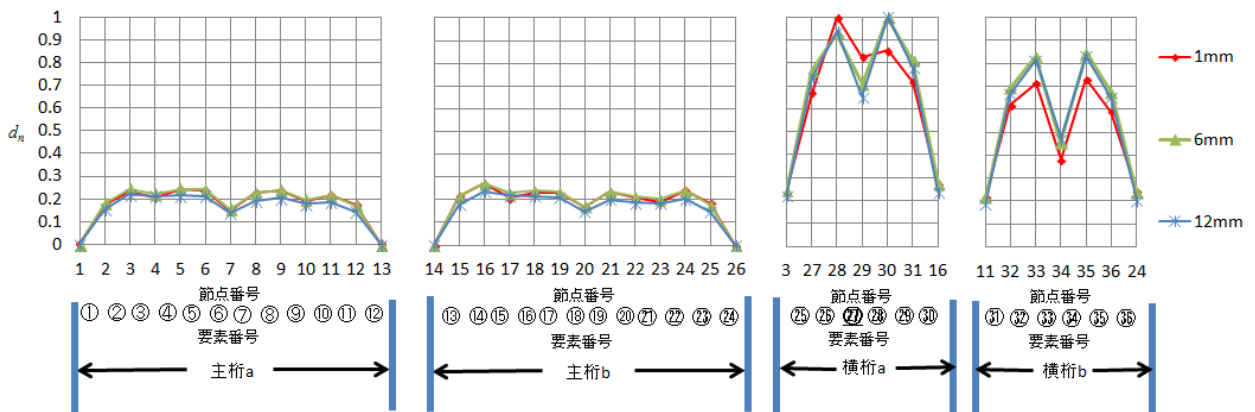
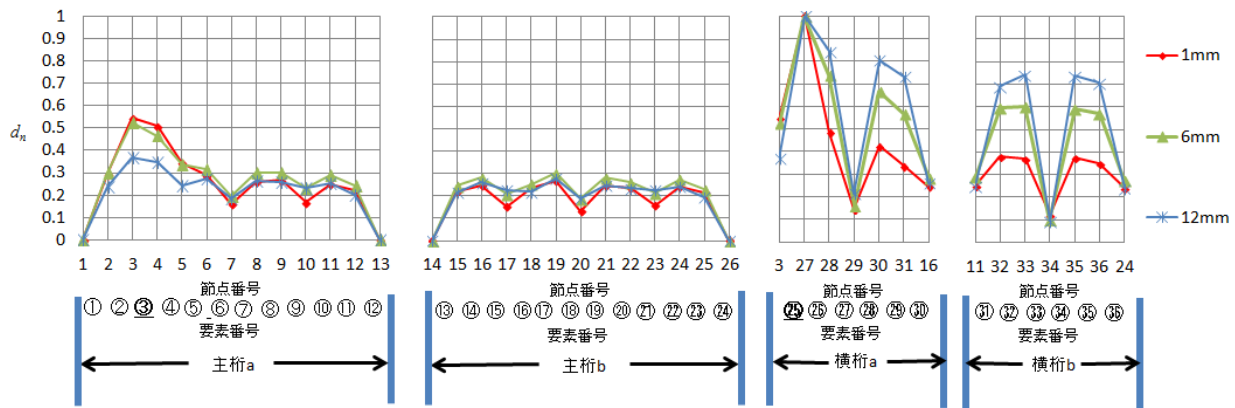


図-7 パターン B：要素(27)が板厚減少した時の損傷指標 d_n

図-8 パターン C：要素(3)、(25)が板厚減少した時の損傷指標 d_n

4.2 パターン B：要素(27)が板厚減少した時の解析結果

図-7 は要素(27)が板厚減少した結果である。 d_n は主桁に比べ横桁が大きいことが分かる。要素(27)の両端である節点 28、29 に着目すると、節点 28 は d_n が大きく、節点 29 は d_n が小さい。板厚減少 1mm では節点 28 の d_n が最も大きい。板厚減少 6mm、12mm では節点 30 の d_n が最も大きい。このことより板厚減少 1mm の方が板厚減少 6mm、12mm よりも位置同定の精度がよいことが分かる。この理由は、断面 2 次モーメントが小さくなるにつれてモード形状全体の振幅に影響が大きく出ているためと考えられる。

4.3 パターン C：要素(3)、(25)が板厚減少した時の解析結果

図-8 は要素(3)、(25)が板厚減少した結果である。要素(3)の両端と要素(25)の両端である節点 3、4、27 に着目すると、節点 27 は 1mm、6mm、12mm すべての板厚減少で d_n が最大値を示している。節点 3、4 は主桁の中で最も d_n が大きい。板厚減少 1mm に着目すると節点 27、3、4 の順番で d_n が大きい。このことより板厚減少が小さい場合において要素の両端の振幅は大きい値を示すことが分かる。この理由は断面 2 次モーメントの減少が小さい場合には板厚減少した要素に隣接する節点が最も振幅変化が起これと考えられる。

以上より板厚減少が小さい場合、 d_n が最大となる節点に着目すると隣接する 2 つの節点では、 d_n が大きい側の要素の板厚が減少している。例えば図-8 で考えると板厚減少が 1mm の場合で d_n が最大の節点は 27 である。節点 27 に隣接する節点は 3、28 であり、 d_n が大きいのは節点 3 である。節点 3、27 の間は要素(25)であり板厚減少の要素である。これは損傷の初期段階では、モード形状そのものはほとんど変化せず、断面 2 次モーメントの減少により損傷箇所のモード振幅だけが影響を受けたためである。一方、損傷していない横桁 b では板厚減少が 6mm、12mm となると、 d_n が主桁 a の節点 3、4 より大きくなり、この指標だけでは位置同定ができなくなる。これは、多自由度系のモード形状は高次になれば節と腹が複雑に出現し、一部の断面減少でもモード形状が変化し、断面減少が大きくなれば健全部でもモード振幅の変化が大きくなると考えられる。

5. まとめ

本研究では鉄道廃線橋梁を対象に FEM を用いて非減衰固有振動解析を行った。健全状態に対して片側の主桁の一部の板厚を減少させた場合、片側の横桁の一部の板厚を減少させた場合、外部からの目視が難しい部材接合部の板厚を減少させた場合、の 3 パターンを解析し、1000Hz までの 1 次から 13 次のモード形状を対象に節点の振幅の絶対値を合計した損傷指標を算出した。結果として、板厚減少が小さい場合に、その要素を特定することができ、早期の損傷位置同定が行えることが分かった。今後は実際に対象橋梁を腐食させ、振動モードの振幅に着目した際に同様の結果が得られるか検討を行っていく。

【参考文献】

- 国土交通省：国土交通白書 2008 平成 19 年度年次報告，ぎょうせい，2008。
- C. Boller, F. Chang, Y. Fujino ed.: Encyclopedia of Structural Health Monitoring Volume 1, A John Wiley and Sons, Ltd., 2009。
- 土木学会構造工学委員会橋梁振動モニタリング研究小委員会：橋梁振動モニタリングのガイドライン，土木学会，2000。
- S. W. Doebling, C. R. Farrar, M. B. Prime, and D. W. Shevitz: Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics, A Literature Review, Los Alamos National Laboratory Report, LA-13070-MS, 1996。
- 古川愛子，小野達也，大塚久哲：高振動数で起振可能なアクチュエータを用いた損傷の有無と位置の推定に関する検討，土木学会論文集，Vol. 66，pp.224-232，2010。
- S. Beskhyroun, S. Mikami, T. Oshima: Nondestructive damage detection scheme for steel bridges, Journal of Applied Mechanics, JSCE, Vol.9, pp.63-74, 2006。