

モード振幅の変化を利用した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 modal amplitude

北見工業大学	学生員	○高祖	伸幸
北見工業大学	正会員	宮森	保紀
北見工業大学	正会員	山崎	智之
北見工業大学	正会員	三上	修一
北見工業大学	F 会員	大島	俊之

1. はじめに

先進国では供用年数が 50 年を超える橋梁が増加している。橋梁は人間による目視点検が行われるが、効率性や客観性に欠けることが懸念される。そこで「構造ヘルスマモニタリング (SHM)」に対する関心が高まっている。SHM は構造物の実時間的な健全性の監視を目指したものである。健全性の監視により構造物の損傷を早期に発見し、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¹⁾。しかし、早期の損傷は滞水しやすく外部からの目視が難しい接合部などが考えられる。SHM のうち振動応答を利用した構造同定手法では過去と現在の振動特性を比較し、損傷を評価する方法が研究されており、損傷の位置を早期に精度良く検出することが期待できる²⁾。

そこで本研究では軽度の損傷の位置を振動モードの局所的な振幅の変化から評価する損傷同定手法を提案する。構造物の軽度の損傷を部材の局所的な板厚減少とする。この板厚減少を接合部に設定し固有振動解析を行う。損傷の前後で各節点のモード振幅の差を求め、わずかな変化により損傷の位置を検出する。

2. 対象橋梁の概要と解析モデル

本研究で対象とする橋梁は小規模な鉄道廃線橋梁の岩尾川橋梁(図-1)である。本橋は I 形鋼の主桁 2 本、溝形鋼の横桁 2 本より構成されており、主桁は木材(古枕木)の上にある丸鋼 4 本で支持されている。本研究では基礎的検討として本橋の FEM モデルを作成して解析を行う。

FEM 解析を行うため 3 次元構造解析プログラムである TDAP III を用いる。対象橋梁の材料特性を表-1 に示す。対象橋梁の主桁と横桁は、梁要素としてモデル化した。節点と要素は図-2 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 は支点であり、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 (13 次モード) まで出力した。この状態を健全状態とし、損傷した時の節点の振幅の変化を検討する。

3. 損傷時の解析モデルとモード振幅変化量の計算方法

損傷時の解析モデルは外部からの目視が難しい要素(3)、(25)が板厚減少した場合を検討する。主桁は下フランジの片側が板厚減少した場合、横桁は下フランジが板厚減少した場合を考慮する。主桁のフランジは厚さが 20mm、横桁のフランジは厚さが 12mm のため板厚減少の厚さは 1mm、6mm、12mm の 3 パターンとし表-2 のように断面積と断面 2 次モーメントを求めた。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。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無次元化した。

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

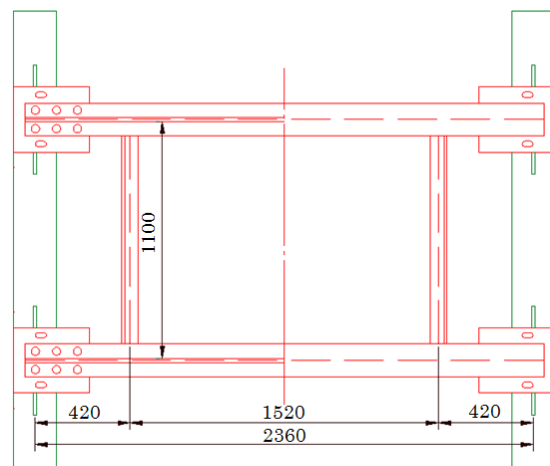


図-1 岩尾川橋梁の平面図(mm)

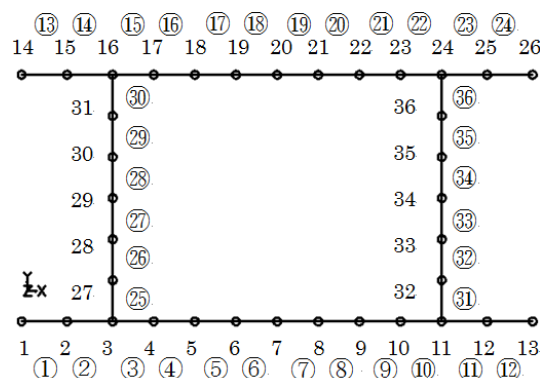
図-2 節点番号と要素番号
(数字は節点、丸数字は要素)

表-2.a I 形鋼の板厚減少

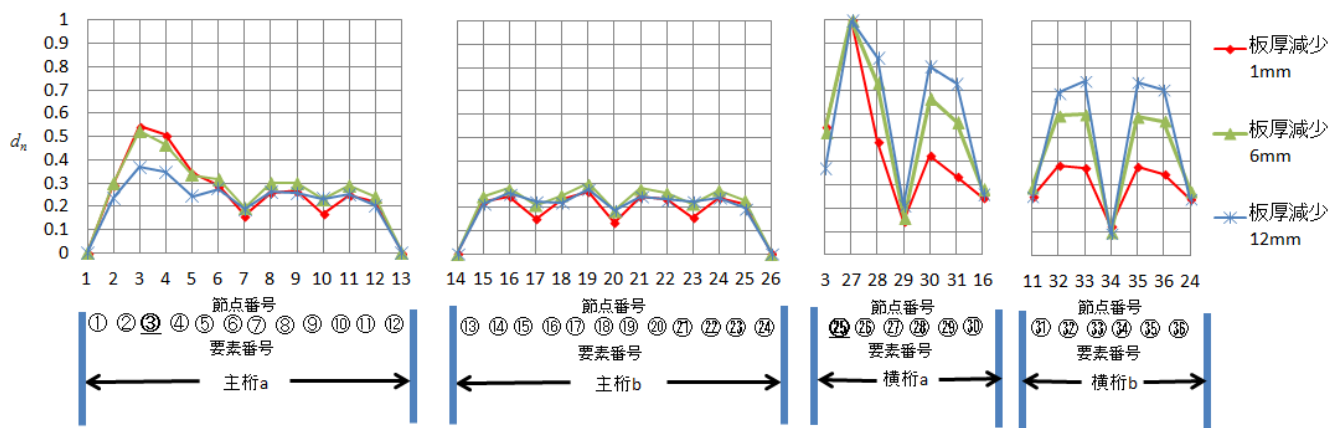
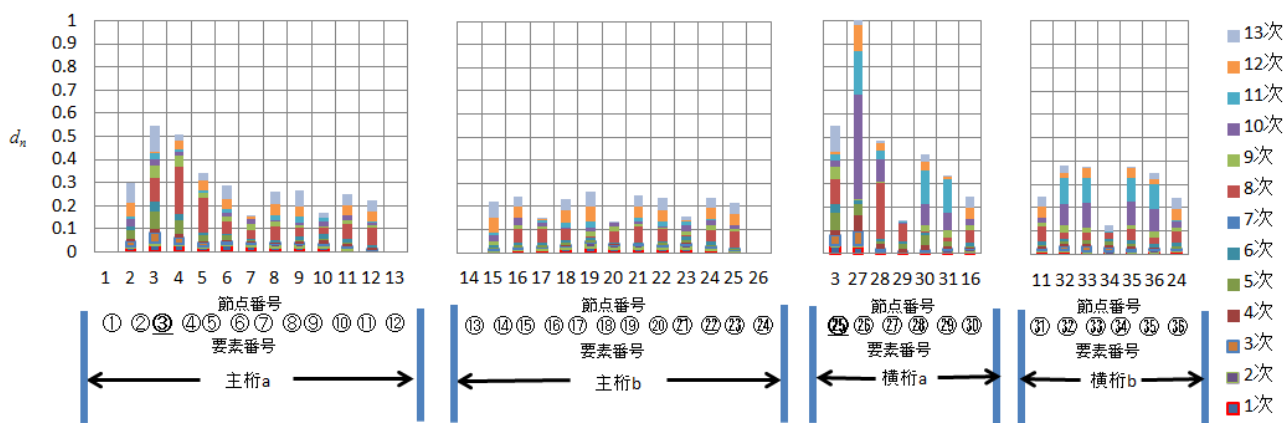
板厚減少	断面積 $\times 10^3$ (mm ²)	断面 2 次モーメント $\times 10^6$ (mm ⁴)	
		y 軸周り	z 軸周り
なし	9.3	95.7	11.8
1mm	9.2	94.9	11.6
6mm	8.9	90.5	10.9
12mm	8.5	84.2	9.9

表-2.b 溝形鋼の板厚減少

板厚減少	断面積 $\times 10^3$ (mm ²)	断面 2 次モーメント $\times 10^6$ (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

キーワード：損傷同定、構造ヘルスマモニタリング、モード振幅

連絡先：〒090-8507 北見市公園町 165 番地 北見工業大学社会環境工学科 Tel:0157-26-9472 (宮森保紀)

図-3 要素(3)、(25)が板厚減少した時の損傷指標 d_n 図-4 1mm 板厚減少した時のモード形状ごとの損傷指標 d_n の内訳

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

4. 板厚減少に対する解析結果と考察

図-3 には 3 パターンの d_n を示し、図-4 には板厚減少 1mm に対する d_n についてモードごとの内訳を表している。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、主桁 b は節点 14 から 26、横桁 a は節点 27 から 31、横桁 b は節点 32 から 36 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。

図-3 では、横桁の節点 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。主桁の中では節点 3、4 が最も 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 d_n は大きい値を示すことが分かる。この理由として断面 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。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。

図-4 では全体的にどの節点でも複数のモード形状の影響が見られる。 d_n が大きい節点 27 に着目すると 10 次モードの d_n が他の d_n に比べて大きいことが分かる。そのほか損傷位置を変えて検討を行った結果、板厚減

少 1mm を要素(6)に設定した場合は節点 6 の d_n が最も大きくなるが、この時は 1 次モードと 8 次モードの寄与が大きい。また、板厚減少 1mm を要素(27)に設定した場合は節点 28 の d_n が最も大きくなり、3 次モードと 10 次モードの寄与が大きくなる。これらの d_n が大きくなるモードは板厚減少の要素に隣接する節点が腹となるモード形状である。板厚減少が小さいときには腹となるモード振幅のみ変化が大きくなるため、複数のモード振幅の和を求める d_n によって損傷位置を検出することができると考えられる。

5. まとめ

本研究では小規模な橋梁を対象に FEM を用いて健全時と損傷時の非減衰固有振動解析を行った。健全状態に対して部材接合部の板厚を減少させた場合を解析し、複数のモード形状を対象に節点の振幅差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に対し、接合部の板厚を減少させた際に同様の結果が得られるか検討を行っていく。

謝辞 本研究の一部は、平成 24 年度ノーステック財団「研究開発助成事業 (talent 補助金)」ならびに北海道土木技術会 鋼道路橋研究委員会の研究支援を受けて行われました。ここに記して感謝いたします。

【参考文献】 1) C. Boller, F. Chang, Y. Fujino ed.: Encyclopedia of Structural Health Monitoring Volume 1, A John Wiley and Sons, Ltd., 2009. 2) 古川愛子, 大塚久哲, 梅林福太郎: マイクロ起振器を用いた振動実験による鋼トラス橋の損傷同定, 応用力学論文集, Vol.9, pp.1103-1110, 2006.