

モード形状の変化を用いた振動実験による鋼供試体の損傷位置同定

Damage localization of steel structure model based on the mode shape changes from vibration test

北見工業大学大学院社会環境工学専攻
北見工業大学社会環境工学科
北見工業大学社会環境工学科
北見工業大学社会環境工学科
北見工業大学社会環境工学科
北見工業大学社会連携推進センター

○学生員 高祖伸幸 (Nobuyuki Kouso)
正 員 宮森保紀 (Yasunori Miyamori)
正 員 山崎智之 (Tomoyuki Yamazaki)
正 員 齊藤剛彦 (Takehiko Saito)
正 員 三上修一 (Shuichi Mikami)
フェロー 大島俊之 (Toshiyuki Oshima)

1. はじめに

橋梁はわが国において重要な社会基盤施設である。高度経済成長期に建設された 50 年以上経過する橋梁の割合は今後、加速度的に大きくなる見込みがあり、維持・管理による定期的な点検が不可欠である¹⁾。この点検は近接目視が主体に行われているが、点検部位によっては効率性や客観性に欠けることが懸念される。そこで、「構造ヘルスマニタリング (SHM)」への関心が高まっている。SHM では対象となる構造物にセンサーを配置し、振動応答による解析結果を過去と現在で比較することにより損傷を評価する研究が行われている^{2)~4)}。

この種の研究では高振動数域の応答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による損傷とみなし評価を行うことを目的とした。具体的には、鋼構造部材の供試体を作成する。供試体に対して振動測定により固有振動数、モード形状を健全状態、部材接合部の板厚減少時でそれぞれ解析する。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、絶対値を合計して損傷指標を作成する。さらに測定対象供試体の諸元に基づく FEM モデルを作成し、非減衰固有振動解析を行って同様の損傷指標を作成し実験値との比較を行った。実験、数値解析ともに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. 実験供試体と実験方法

本研究の振動実験では図-1 のような供試体を用いた。幅 50mm、厚さ 4.5mm の平鋼 (SS400) を使用して主桁 2 本と横桁 2 本を作成し、ナベ小ねじ 16 本に M4 二種ナット、ワッシャーを使用して接合してある。支間長は 1m であり主桁は丸鋼 2 本で支持している (図-2)。



図-1 実験供試体の写真

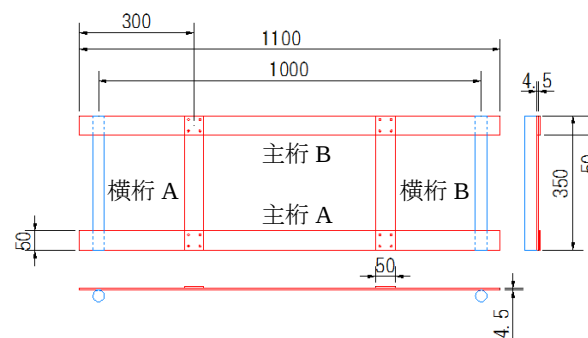


図-2 実験供試体の一般図 (mm)

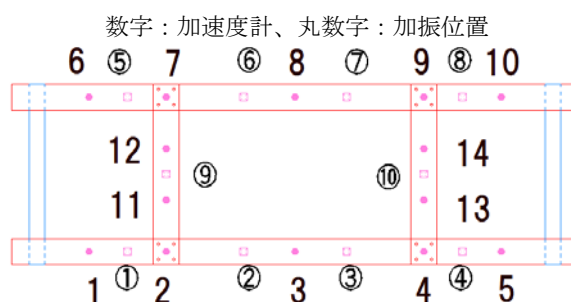


図-3 加速度計設置位置と加振位置

実験では供試体を鉛直方向に加振し、減衰自由振動測定を行った。振動測定には、小野測器 NP-3130 圧電型加速度計を 14 基用いた。サンプリング周波数は 10000Hz である。数値解析による検討から、加速度計設置位置と加振位置を図-3 のように決定した。加速度計設置位置を数字で、加振位置を丸数字で表す。

加振位置は加振した場所が節となるモードは励起することができない。そのため、より多くのモードを同定するために 10 箇所を加振した。加振にはインパルスハンマを用いて、瞬間的に供試体を叩いた。2 回打撃を防ぐため荷重の時刻歴波形を確認している。測定した加速度

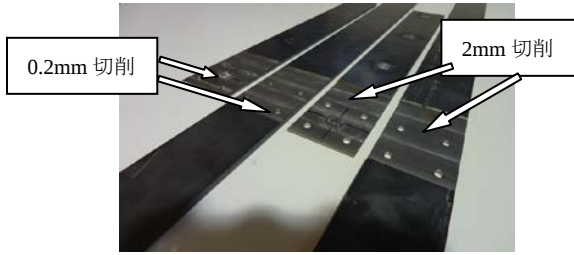


図-4 切削した鋼材の一部

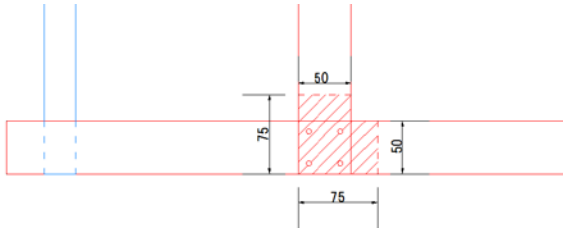


図-5 接合部と切削箇所(mm)

表-1 平鋼の断面積と断面 2 次モーメント

板厚減少 (mm)	断面積 $\times 10^{-3}(\text{m}^2)$	断面 2 次モーメント $\times 10^{-9}(\text{m}^4)$	
		弱軸周り	強軸周り
なし	0.23	0.38	46.9
0.2	0.22	0.33	44.8
2	0.13	0.07	26.0

波形をパワースペクトルに変換しピークを固有振動数とした。ピークにはバンドパスフィルタを適用し、振幅の最も大きくなる点をモード振幅とし、10 個の加速度波形で得られたモード振幅を平均している。

3. 損傷時の実験供試体と損傷指標

損傷は腐食による部材の板厚減少を考える。本研究では図-3 における測点 2 付近の部材接合部の損傷を考慮し、図-4 のように 0.2mm 切削した鋼材 2 本と 2mm 切削した鋼材 2 本を作成した。切削した部分の鋼材の断面積と断面 2 次モーメントは表-1 の通りになる。これらを図-5 のように組み合わせて、元の供試体の部材と交換する。0.2mm 切削した鋼材 2 本を用いた供試体は微小な損傷を想定したものであり、2mm 切削した鋼材を用いたものは、比較的大きな接合部の損傷を想定している。

無損傷時と合わせて 3 つの供試体の振動測定を行いモードを解析した。無損傷時はモードが 16 個得られた。固有振動数は 1 次が 8.16Hz であり 16 次は 439.3Hz である。板厚減少が 0.2mm の場合、モードは 18 個得られた。固有振動数は 1 次が 8.1Hz であり 18 次は 451.1Hz である。板厚減少が 2mm の場合、モードは 18 個得られた。固有振動数は 1 次が 7.9Hz であり 18 次は 683.0Hz である。モード解析では、近い振動数で同じモード形状が得られる場合や板厚減少時のモード解析では無損傷時にはなかったパワースペクトルのピークが現れる場合があり、得られるモードに違いがみられた。そのため、無損傷時のモードと板厚減少時のモードは固有振動数とモード形

状の近いものを比較対象として選定し、板厚減少が 0.2mm で 11 個、板厚減少が 2mm で 13 個となった。

損傷位置を同定するための損傷指標は、まず板厚減少によるモード振幅の変化の大きい測点を、観測されたすべてのモードで足し合わせることで求める。具体的には k 次モードに対する健全時の各測点のモード振幅 ϕ_k に対し、板厚減少時を ϕ_{dk} 、モード次数の最大を m として、板厚減少 n mm に対して(1)式のように損傷指標 d_n を求める。また、測点間でモード形状の変化の度合いが異なる点を検出するために(2)式のように隣接する測点間で d_n の差分を求める。

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

$$d_n' = |d_{np} - d_{nq}| \quad (2)$$

板厚減少が 0.2mm の時は $n=0.2$ 、 $m=11$ 、板厚減少が 2mm の時は $n=2$ 、 $m=13$ 、 p と q は図-3 に基づき隣接する測点から求める。

4. 実験による損傷同定結果

図-6 に板厚減少 0.2mm の結果である $d_{0.2}$ と $d_{0.2}'$ を示し、図-7 に板厚減少 2mm の結果である d_2 と d_2' を示す。主桁 A は測点 1 から 5 まで、主桁 B は測点 6 から 10 まで、横桁 A は測点 11 から 12 まで、横桁 B は測点 13 から 14 までとなっている。

4.1. 板厚減少 0.2mm の結果

図-6(a)に着目すると $d_{0.2}$ では測点 11 が最大となっている。図-6(b)の $d_{0.2}'$ では測点 2 が大きい。測点 2 は板厚減少箇所、測点 11 は板厚減少箇所付近の横桁であり、損傷位置を示している。これは微小な断面 2 次モーメントの減少がモード振幅に影響していると考えられる。

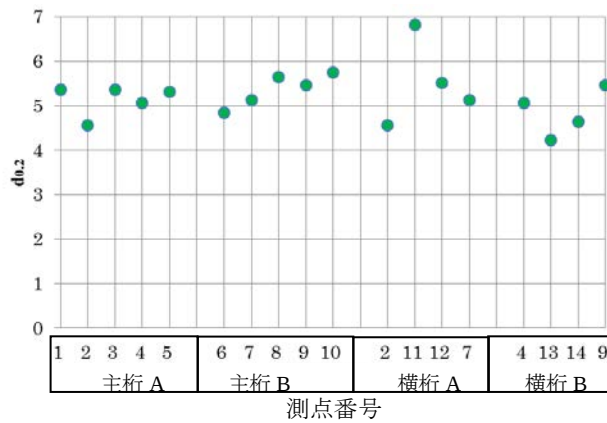
4.2. 板厚減少 2mm の結果

図-7(a)では d_2 の値がほかと比較して特に大きいものはない。これは、局所的な断面の変化が、モード形状全体に影響を与えたと考えられる。図-7(b)では横桁の測点 2 が最大値を示しており、測点 11 も比較的大きい。測点 2 と測点 11 は損傷付近である。しかし、測点 9 は損傷していないが高い値を示しており、検討の必要がある。

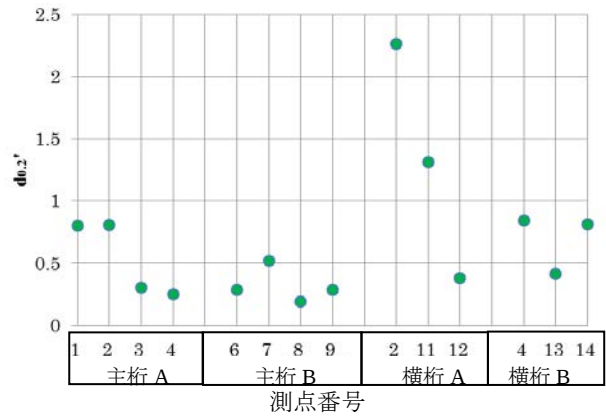
以上のように板厚減少の小さい場合には d_n が損傷位置の測点を示している。板厚減少が大きくなると、この指標だけでは位置同定ができなくなる。しかし、損傷指標 d_n' では損傷位置の値が大きくなるため、 d_n と d_n' の両方を使用すれば損傷位置がより精度よく検出できる。これは損傷の初期段階では、モード形状そのものはほとんど変化せず、断面 2 次モーメントの減少により損傷箇所のモード振幅だけが影響を受けたことが考えられる。一方、損傷が大きくなると一部の断面減少でもモード形状全体が変化し、断面減少が大きくなれば健全部でもモード振幅の変化が大きくなるためであると考えられる。

5. 数値解析による再現

無損傷時、板厚減少 0.2mm の供試体、板厚減少 2mm の供試体について FEM モデルを作成する。FEM モデル

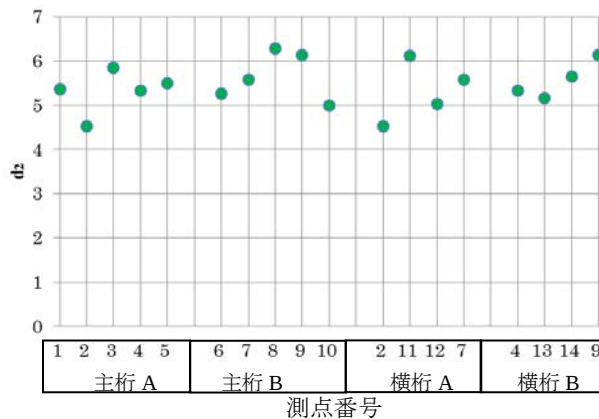


(a) 各測点における $d_{0.2}$

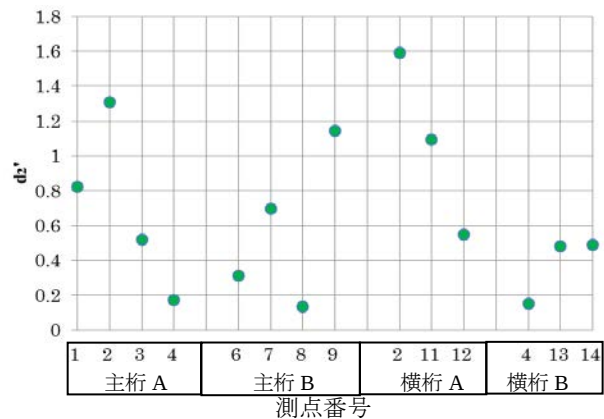


(b) 各測点(p)における $d_{0.2}'$

図-6 実験結果 (板厚減少 0.2mm)



(a) 各測点における d_2



(b) 各測点(p)における d_2'

図-7 実験結果 (板厚減少 2mm)

は 3 次元構造解析プログラムである T-DAPIII を用いて構築し、非減衰固有振動解析を行った。平鋼は幅 50mm、厚さ 4.5mm の寸法で梁要素としてモデル化した。平鋼の断面積と断面 2 次モーメントは表-1 に、材料特性は表-2 に示す。節点は図-8 のように設定した。節点の間隔は 50mm である。節点 1、21、22、42 は支点で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 18 次モードまでを解析した。損傷時の解析モデルは節点 6、7、43 の間が板厚減少した場合を考慮した。板厚減少の厚さは 0.2mm、2mm とし表-1 の断面積と断面 2 次モーメントを設定して 18 次モードまでを解析した。実験を再現するために、実験の損傷指標で使ったモードと同じモードを選定し、(1)式と(2)式を用いて損傷指標を作成した。

図-9 に板厚減少 0.2mm の結果である $d_{0.2}$ と $d_{0.2}'$ を示し、図-10 に板厚減少 2mm の結果である d_2 と d_2' を示す。主桁 A は節点 1 から 21 まで、主桁 B は節点 22 から 42 まで、横桁 A は節点 43 から 47 まで、横桁 B は節点 48 から 52 までとなっている。

5.1. 固有振動解析 (板厚減少 0.2mm) と実験の比較

図-9 の $d_{0.2}$ と実験を比較すると節点 7、43、6 の順で大きく損傷位置の精度がよい。節点 6、7、43 の間は板厚減少しており断面 2 次モーメントの減少が $d_{0.2}$ によく現れている。図-9 の $d_{0.2}'$ は主桁 A の節点 7 が最大であ

表-2 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

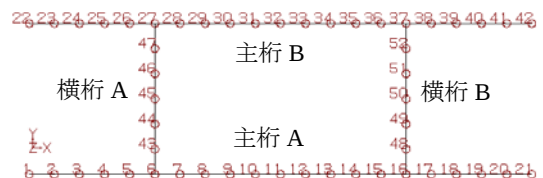


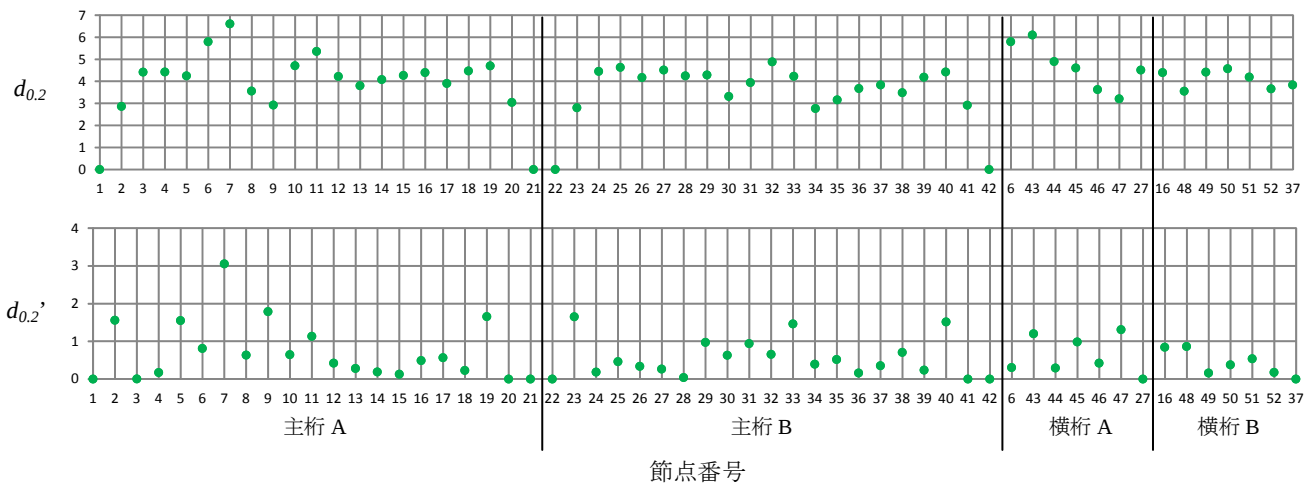
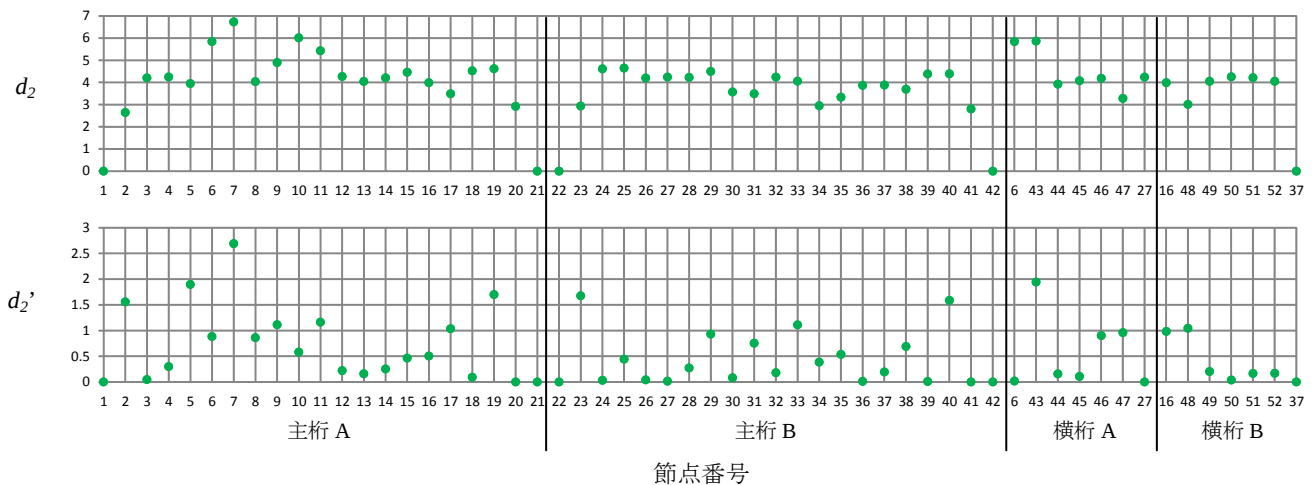
図-8 節点番号

るが、実験結果では横桁 A の測点 2 が最大となっており違いがある。これは、固有振動解析では、節点 7 が断面 2 次モーメントの変化位置であり、振幅変化の影響がよく現れているが、実験では解析ほど密には加速度計を設置していないことから違いが生じたと考えられる。

5.2. 固有振動解析 (板厚減少 2mm) と実験の比較

図-10 の d_2 は節点 7、43、6 の順で大きい。実験の図-7(a) では、測点間の顕著な違いがなく、FEM 解析の方が良好な結果となっている。図-10 の d_2' は主桁の節点 7 が最大であり、実験は横桁 A の測点 2 が最大で違いがある。これは、実験では加速度計の数に限度があり、損傷付近の測定ができなかったことが原因と考えられる。

以上より、固有振動解析では d_n と d_n' の両方で損傷位置がわかるが実験では d_2 でわからない。これは、加速

図-9 FEM 解析における $d_{0.2}$ と各節点(p)の $d_{0.2}'$ 図-10 FEM 解析における d_2 と各節点(p)の d_2'

度計の数に限度があり、損傷付近の測定ができなかったことが原因と考えられる。また、測点が少ないため高次のモードにおいては腹や節の数を判断することが困難である。加えて、ハンマの打撃で十分に起振できたモードとできなかったモードがあることも原因として考えられ、測点をより高密度に配置することと、加振方法の改善をする必要がある。

6. まとめ

本研究では鋼製の供試体を対象に減衰自由振動測定を行った。健全状態に対して外部からの目視が難しい部材接合部の板厚を少し切削した場合と半分切削した場合を解析し、1 次から 18 次までの同じモード形状を対象に節点の振幅を合計した損傷指標と、変化の度合いが異なる点を検出する損傷指標を算出した。結果として、板厚減少の位置を特定することができたが損傷同定の程度は固有振動解析と実験で違いがみられた。今後は加振方法と測点の位置や数を検討し、実橋梁で本論文の損傷指標を適用して検討を行っていく必要がある。

謝辞：本研究の一部は科学研究費補助金（若手研究（B）、課題番号：25870025）の研究助成による支援を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 国土交通省：平成 24 年度 国土交通白書，
<http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h24/hakusho/h25/index.html>, 2013.
- 2) C. Boller, F. Chang, Y. Fujino ed.: Encyclopedia of Structural Health Monitoring Volume 1, A John Wiley and Sons, Ltd., 2009.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) S. Beskhyroun, S. Mikami, T. Oshima: Nondestructive damage detection scheme for steel bridges, Journal of Applied Mechanics, JSCE, Vol.9, pp.63-74, 2006.