

局部振動加振による鋼構造部材の損傷検出に関する研究

Research on Damage Detection of Steel Member by Local Vibration Excitation

北見工業大学大学院 ○学生員 大西 功基 (Kohki Onishi)
 北見工業大学 フェロー 大島 俊之 (Toshiyuki Oshima)
 北見工業大学 正 員 三上 修一 (Shuichi Mikami)
 北見工業大学 正 員 山崎 智之 (Tomoyuki Yamazaki)

1. はじめに

我が国において、戦後の国土復興とその後の高度経済成長期において、非常に多くの社会基盤施設を作ってきた。これらの多くの社会基盤施設は建設後数十年を経過しており、何らかの損傷を生じているものが多くなりつつあり多額の維持管理・更新費用がかかることが予想される。また今後数十年にわたって損傷に起因した性能限界を超える構造物が増加することが考えられ、現実的には我が国の経済成長率や財政状況から考えると供用年数を超えているすべての橋梁等を架け替えることは困難であり、構造物の長寿命化を目指すことが重要な課題になるものと考えられる。

このような背景から、構造物の維持・補修を行う時期を検討することが重要となるため、損傷度の把握および健全度の判定の方法が確立されることが必要となることが考えられる。

近年、損傷評価および健全度の判定に関する研究が盛んに行われており、構造物の損傷評価法として、橋梁の振動特性に着目する方法が研究されている¹⁾。小幡²⁾らは実際の橋梁では溶接部や2次部材が損傷する場合が多く、それらが損傷した場合に着目し、低次から高次の卓越振動数領域データに対して自己相関関数から分散値を求めて損傷同定の有効性を検討している。

本研究では積層圧電アクチュエータによりボルト連結鋼構造物モデルに局部的に微小振動を与え振動実験を行い、実験供試体を支持するボルト連結部のボルトのゆるみによる振動特性の変化を捉え、積層圧電アクチュエータによる局部振動加振が鋼構造部材の損傷検出に有効であることを提案する。また、振動実験に用いた供試体を有限要素法によってモデル化を行い固有振動解析を行った。このとき、ボルト連結部の弛緩状態をバネ要素でモデル化することとし、このバネ要素のバネ定数を解析的に評価する手法として、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いてバネ定数の同定を行い、損傷同定の可能性を検討した。

2. 実験概要

実験供試体を図-1に示す。供試体は断面 350×350mm、鋼材の厚さは外板 19mm、中板 12mm のH形鋼である。また供試体の長さは 2200mm となっており、両側に配置された支柱と溶接により固定されたL字形の支持板とH形鋼の両端はボルト 8 本により接合されている。

本研究における仮想的な健全・損傷状態とは、H形鋼の両端を接合しているボルトをすべて締結した状態を健

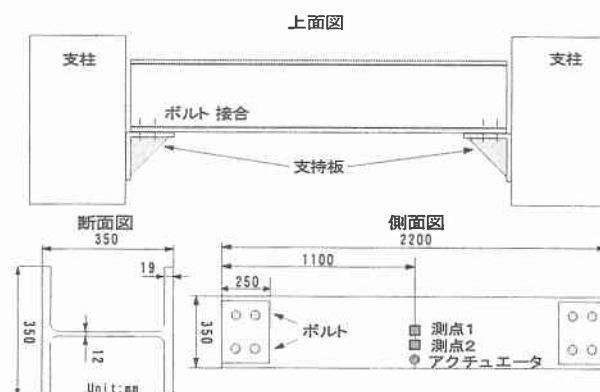


図-1 実験供試体



図-2 実験ケース

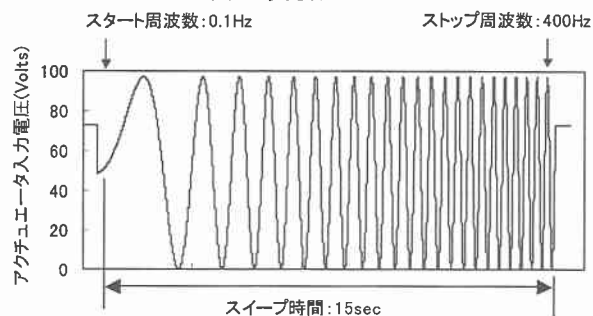
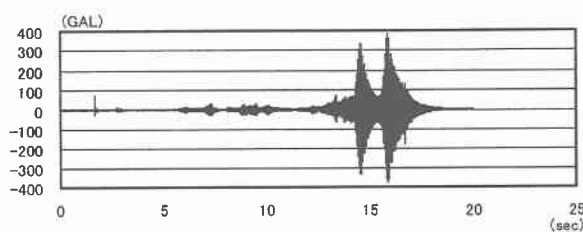


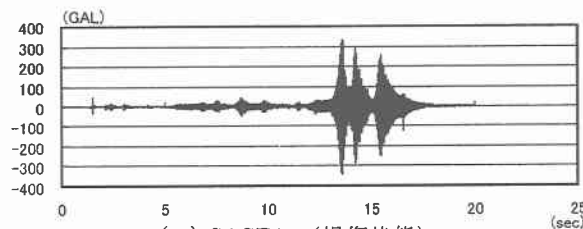
図-3 スイープ加振波形

全状態とし、ボルトを弛緩することにより各種の損傷状態を表現することとした。本研究で設定した実験ケースを図-2に示す。ここでボルト締結時の入力トルクは 350N・m とし、弛緩ボルトには加振時にがたつきが起らないように、わずかなトルクを導入している。

本実験では加振機として積層圧電アクチュエータを用いた。それぞれの実験ケースに対して、ファンクションジェネレータを使用して図-3に示すようにスタート周波数 0.1Hz、ストップ周波数 400Hz とし、周波数が直線的に連続で変化する sin 波により局部的に加振する振動実験を行った。また、このスイープ加振実験により求められた固有振動数を加振振動数として加振させ、減衰自由振動実験も行った。

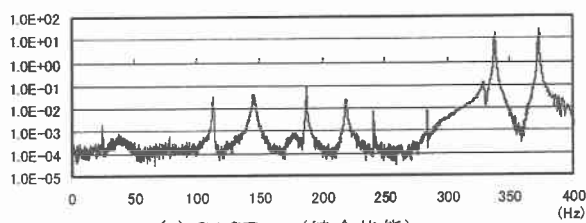


(a) CASE1 (健全状態)

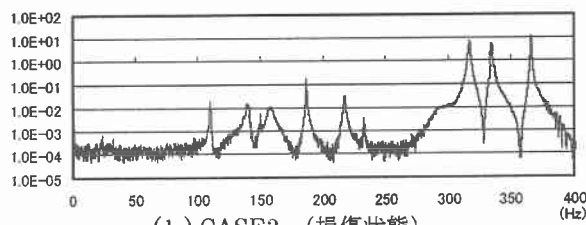


(b) CASE3 (損傷状態)

図・4 加速度応答波形

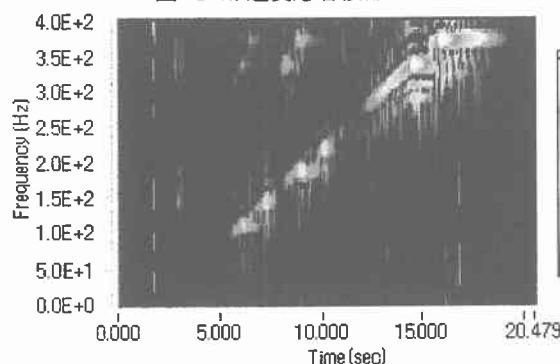


(a) CASE1 (健全状態)

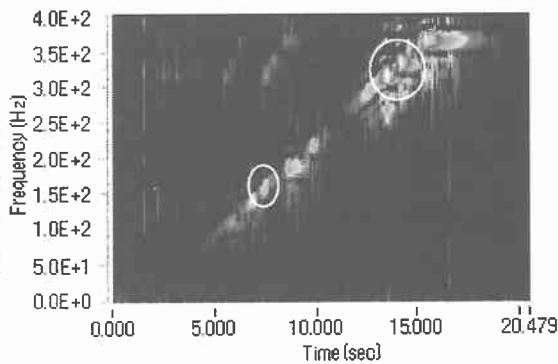


(b) CASE3 (損傷状態)

図・5 パワースペクトル



(a) CASE1 (健全状態)



(b) CASE3 (損傷状態)

図・6 時間・周波数解析結果

表・1 各ケース実験結果

実験ケース	1次モード		3次モード		4次モード		5次モード		7次モード		11次モード	
	固有振動数	減少率(%)	固有振動数	減少率(%)	固有振動数	減少率(%)	固有振動数	減少率(%)	固有振動数	減少率(%)	固有振動数	減少率(%)
CASE1	24.707		113.184		145.801		187.762		219.629		328.808	
CASE2	24.512	-0.790	112.598	-0.518	141.797	-2.746	187.143	-0.330	218.017	-0.734	327.978	-0.252
CASE3	23.535	-4.743	110.254	-2.589	139.160	-4.555	186.786	-0.520	216.503	-1.424	316.943	-3.608
CASE4	24.512	-0.790	112.891	-0.259	143.652	-1.474	187.482	-0.149	218.896	-0.334	328.125	-0.208
CASE5	24.316	-1.581	112.012	-1.036	144.238	-1.072	187.278	-0.258	217.822	-0.823	325.878	-0.891
CASE6	24.219	-1.976	111.621	-1.381	142.285	-2.411	186.881	-0.469	216.748	-1.312	323.583	-1.589
CASE7	24.707	0.000	113.086	-0.087	144.824	-0.670	187.769	0.004	219.482	-0.067	328.515	-0.089

3. 実験結果

スイープ加振(スタート周波数 0.1Hz、ストップ周波数 400Hz、スイープ時間 15sec)による実験結果の一例として、CASE1 および CASE3 の測点 2 で測定された加速度応答波形ならびにパワースペクトル図を図・4(a),(b)ならびに図・5(a),(b)に示す。加速度応答波形を見ると、CASE3 の波形形状が変化しており、損傷により健全時と異なる共振応答を示したと考えられる。

また、パワースペクトル図を見てみると、CASE3 では 11 次モードの卓越(CASE1: 328.80Hz)が視覚的にも大きく振動数の減少側へと移動し、160Hz 付近の卓越が新たに出現しており、高次振動数領域においてボルトの拘束状態の変化により振動特性に変化が現れていることが考えられる。

スイープ加振実験は周波数特性が時間で変化する波形により加振しているため、LabVIEW の Signal Processing Toolset により Gabor spectrogram を使用して時間・周波数解析を行った²⁾。その解析結果を図・6(a),(b)に示す。解析結果からは、スイープ加振に対応

して直線的に固有振動数値でのスペクトルが現れている。損傷時ではグラフ中丸印で示した位置で健全時と異なるスペクトルが現れておりグラフから視覚的に容易に損傷の判断をすることが可能である。スイープ加振による損傷検出実験を行う際には解析手法として時間・周波数解析が損傷発生等の判断に有効であることが確認された。

表・1 に各ボルト弛緩ケースでの実験結果、および健全時(CASE1)からみた損傷時(CASE2~CASE7)の固有振動数の変化の程度を減少率として示している。また、図・7 は 3 次、4 次、5 次、11 次の固有振動数の各ボルト弛緩ケースでの減少率の変化を示している。減少率の変化を見てみると、CASE3 が最も減少程度が大きく、続いて CASE6 が大きくなる傾向となっている。また、CASE7 の減少程度が小さい結果となっている。CASE3 の減少率が大きくなった原因として、H 形鋼の片側のフランジのみ支持しているため、上部側のボルトが弛緩されると反対側のフランジの自重により弛緩具合が大きくなるためであると考えられる。CASE6 は支持板の内側のボルトを弛緩しているため、固定間隔が長くなることによ

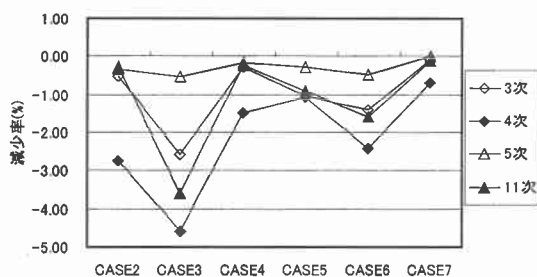


図-7 各ケースにおける減少率の比較

て減少程度が大きくなり、CASE7 は外側のボルトを弛緩しているため、健全時(CASE1)と固定間隔が変わらないため、減少程度が小さくなったと考えられる。

次に、各実験ケースでの減衰定数の変化を調べるために、モード次数5次の振動数に着目し、各ボルト弛緩ケースでスイープ加振により探索された5次モードの固有振動数でsin波により10sec加振し、減衰自由振動実験を行った。

測定結果に対してバンドパスフィルタ処理を行い、非線形最小二乗法により減衰定数を求めた。各実験ケースにおける固有振動数と減衰定数の変化を図-8に示す。CASE3およびCASE6のように、固有振動数が減少しているとき減衰定数は増加し、CASE7のようにボルト弛緩による固定間隔が健全時と変化がないときには、減衰定数は小さな値となっている。このことから、本実験においても損傷が大きいために、5次モードに着目した際には、固有振動数は減少し、減衰定数は増加する傾向にある。しかし、他の振動次数において、同様な傾向となることを実験によって確認する必要がある。

4. GAによる弛緩部分の評価

本研究では、ボルト弛緩による支持板とH形鋼との接触力の状態を把握するために、多数の離散値を有する最適化問題に有効であると考えられている遺伝的アルゴリズム(GA)により評価を試みるものである。

はじめに、汎用構造解析プログラムMARCにより供試体を節点数157、要素数40の8節点シェル要素によりモデル化を行った。図-9に解析モデル図を示す。H形鋼と支持板との接触状況を3方向(X,Y,Z)のバネ要素によりモデル化し、図-10は配置したバネ要素の配置状況を示し数字はバネ要素番号を示す。本研究ではボルト弛緩部分のバネ剛性値をGAにより算出し評価することとした。

本研究における解析流れ図を図-11に示す。解析流れ図からもわかるように固有振動解析を繰り返し計算するときの計算時間等の問題から本研究における解析モデルは簡略化したモデルとしている。ここで、簡略化したため要素分割による精度の影響からCASE1(健全時)での固有振動解析を行う際に、バネ剛性値をボルトのヤング率・断面積・ボルトの締め付け長さより算出した値を使用すると、実験値より若干大きな解析結果が得られた。このため、まずCASE1のバネ剛性値の同定を行い、同定された健全時のバネ剛性値を使用してCASE3(損傷時)の同定を行うこととした。

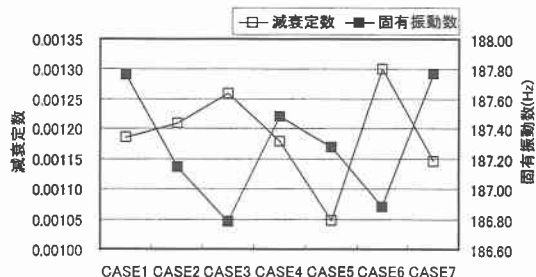


図-8 固有振動数および減衰定数の変化(5次モード)

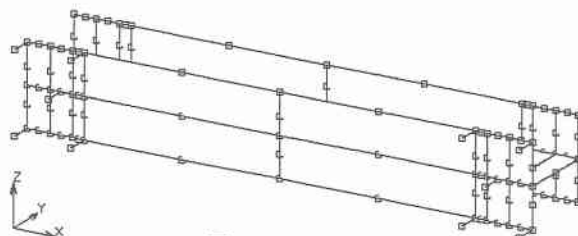


図-9 解析モデル

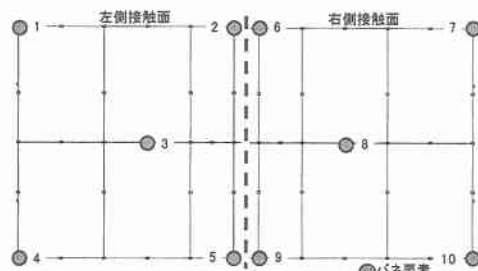


図-10 バネ要素配置状況

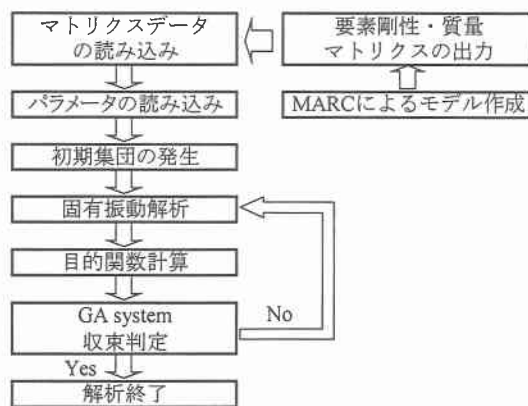


図-11 解析流れ図

CASE1のGAの適用方法は、人口数100、交叉率0.6、突然変異率0.05、世代数150とした。同定対象は支持板との接触状況を表現する合計30本の3方向のバネ剛性値とし、パラメータをボルトのヤング率等から算出したバネ剛性値に乘ずる係数とし、設定したパラメータを表-2に示す。表-2に示すパラメータを4ビットの2進数にコード化して同定を行い、収束判定方法は150世代が終了した時点でGAによる解析を終了することとした。

本研究では、目標値を実験より得られた1次・3次・4次の固有振動数とし、以下のような目的関数を用いて、この目的関数値を最小化するようなパラメータを探索することとした。

$$OBJ = \sum_{i=1}^3 (f_e(i) - f_a(i))^2 + \sum_{i=1}^3 \{(f_e(i+1) - f_e(i)) - (f_a(i+1) - f_a(i))\}^2$$

ここで f_e は実験により得られた固有振動数、 f_d は固有振動解析により得られる解析値である。式中の右辺第 2 項はパラメータの組み合わせにより解析結果に生じる固有振動次数の入れ替わりを評価するものとしている。

表-3 に固有振動数の同定結果を示す。実験値とほぼ等しい結果が得られており、このときに選択されたパラメータにより得られたバネ剛性値を健全時の値とした。

次に、CASE1 の同定により得られたバネ剛性値を使用して CASE3 の弛緩部分の評価を行う。CASE3 は上部側のボルトが弛緩されているので、バネ要素番号 1～3、6～8 までの合計 18 本からなる 3 方向のバネ剛性値を同定対象として解析を行った。

CASE3 の GA の適用方法およびパラメータは CASE1 と同じ数値を使用し、収束判定方法も同様とした。

表-4 に、CASE3 の固有振動数同定結果を示す。同定結果では 1 次で誤差が見られるが、3 次・4 次は実験値とほぼ等しい結果が得られている。解析結果に誤差が生じた原因として、本解析では同定変数が多くなることを避けるため回転方向のバネ剛性値の同定を行っていないことが原因の一つであると考えられる。

表-5 は GA によって同定された各バネ要素のパラメータであり、CASE1 に対する損傷程度を表す値となっている。結果からは X,Z 方向のバネ剛性値の減少程度が大きくなっており、ボルト弛緩によって生じた固有振動数の減少程度が大きくなった原因は、支持板と H 形鋼との接触面での摩擦力が減少したことが主たる原因となっていることが解析結果から判断することができる。

以上のことから、ボルト連結部の弛緩状態をバネ要素でモデル化を行い、GA を用いた解析システムにより損傷程度（弛緩状態）を評価することが可能であり、損傷程度を算出する手法として有効な手段になり得ることを示していると思われる。

5. まとめ

本研究は鋼構造部材を有する構造物を対象として、加振方法として積層圧電アクチュエータにより局部振動加振する方法を採用し振動実験を行い、損傷検出の有効性を確認し、解析によりボルト連結部の弛緩状態を評価するために接触状況をバネ要素によりモデル化し、GA により損傷程度の評価を試みたものである。

本研究により得られたことをまとめると、以下のようになる。

- (1) 積層圧電アクチュエータを利用して、高次の振動数領域までスイープ加振することで構造物の振動特性を把握でき、損傷時には応答加速度波形およびスペクトルからも有意な変化が見られ、また、時間・周波数解析を行うことにより容易に損傷発生等の判断が可能であることが確認された。
- (2) 各実験ケースの解析により、11 次モードまでの高次固有振動数の変化を比較すると、CASE3 の弛緩状態が健全時に対して 3.6%(12Hz)減少し、構造全体の固有振動数に大きく影響を及ぼすことが確認された。
- (3) 解析により、ボルト連結部の弛緩状態をバネ要素でモ

表-2 パラメータ

1.0E-3, 2.0E-3, 4.0E-3, 6.0E-3, 8.0E-3
1.0E-2, 2.0E-2, 4.0E-2, 6.0E-2, 8.0E-2
1.0E-1, 2.0E-1, 4.0E-1, 6.0E-1, 8.0E-1, 1.0E+0

表-3 CASE1 固有振動数同定結果

モード次数	実験値	同定結果
1	24.707(Hz)	25.147(Hz)
3	113.184(Hz)	112.273(Hz)
4	145.801(Hz)	147.351(Hz)

表-4 CASE3 固有振動数同定結果

モード次数	実験値	同定結果
1	23.535(Hz)	25.576(Hz)
3	110.254(Hz)	109.506(Hz)
4	139.160(Hz)	138.836(Hz)

表-5 CASE3 バネ剛性値同定結果

バネ要素番号	同定パラメータ		
	X	Y	Z
1	2.0E-2	8.0E-2	6.0E-1
2	2.0E-1	4.0E-1	2.0E-2
3	1.0E-1	4.0E-1	1.0E-2
6	8.0E-3	6.0E-1	2.0E-2
7	2.0E-3	1.0E-3	1.0E-2
8	1.0E-3	8.0E-2	4.0E-2

デル化を行い、GA を用いることで損傷程度を解析的に評価することが可能であり、損傷の評価手法として有効であることが確認された。

今後の課題として、解析システムを損傷位置も判断できるように発展させ、より客観的な損傷の評価手法を確立していくことが課題である。

【参考文献】

- 1) 松井義孝,青地知也,大島俊之,林川俊郎,当麻庄司: 連続ラーメン橋の橋脚の材料非線形生と減衰定数について,橋梁振動コロキウム'97 論文集,pp.101-108,1997
- 2) 小幡卓司, 林川俊郎, 佐藤浩一,水草浩一: 振動モニタリングデータに基づいた鋼橋の損傷同定に関する基礎的研究,構造工学論文集,Vol.46A,pp.531-538,2000.3
- 3) National Instruments: Signal Processing Toolset User Manual, 2001.1
- 4) 林川俊郎,須志田健, 小幡卓司, 佐藤浩一: GA を用いた木造アーチ形式歩道橋の構造同定に関する研究, 構造工学論文集, Vol.44A,pp.1211-1218,1998.3
- 5) 大西功基,大島俊之,三上修一,山崎智之,高田直幸: 高次振動解析による鋼桁ボルトのゆるみの検出, 土木学会第 56 回年次学術講演会公演概要集, I-A157, 2000.10