

局部振動による鋼材接合部の損傷評価に関する研究

Study on Damage Evaluation of Joint in Steel Member by using Local Vibration Excitation

山崎智之*, 大島俊之**, 大西功基***, 三上修一****

Toshiyuki Oshima, Tomoyuki Ymazaki, Kohki Onishi, Shuichi Mikami

*正員, 北見工業大学助手, 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

**フェロー, 工博, 北見工業大学教授, 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

***正員, 工修, ㈱不二陸水工研 (〒001-0908 札幌市北区新琴似 8 条 1 丁目 1-34)

****正員, 博士(工), 北見工業大学助教授, 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

This paper deals with the local excitation method of vibration test by using multilayer piezoelectric actuators as input device to specimen for the purpose of detecting comparatively small damage of steel structural member, and measures change of an vibration characteristics. It is shown that the vibration test by using multilayer piezoelectric actuator is effective to damage detection of steel structural member. After releasing bolt supports of a steel structural member, the vibration test is carried out, and the validity of damage detection is examined. The analytical software system using genetic algorithm (GA) to evaluate the location and level of released bolts as a model of damage, is examined. And effectiveness of that system is verified by comparing with the experimental results.

Key Words : vibration characteristics, local excitation method, FEM, genetic algorithms(GA)

1. はじめに

我が国において、戦後の復興とその後の高度経済成長期に非常に多くの社会基盤施設を作ってきた。これら多くの社会基盤施設は建設後数十年を経過しており、現在では何らかの損傷を生じているものが多くなりつつある。また、損傷に起因した性能限界を超える構造物が増加していると思われる。今後これらの社会基盤施設の維持管理や建設には多額の費用がかかると予想される。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、構造物の維持・補修により長寿命化を目指すことが非常に重要な課題になると考えられる。

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であり、損傷度の把握および健全度の判定方法を確立することが必要と考えられる。

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)~5)}。供試体レベルの実験においては主部材に大きな損傷がある場合、剛性が低下し、低次の固有振動数に変化が見られるという報告がある。宮本¹⁾らは既存の RC 橋において人工損傷導入による振動特性の変化を測定し、固有振動数や減衰特性、位相差等を考慮した解析を行い、損傷評価を検

討している。岡林²⁾らはノート型パソコンを利用した可搬型振動計測システムを構築して橋梁振動測定を行い、実時間で振動モードを検出することを検討している。また小幡³⁾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。

以上のように損傷による構造全体の振動特性に関する研究はこれまでも行われてきたが、本研究は鋼構造部材の損傷について構造部材を局部微小振動させ、部材自体の振動特性変化により損傷評価を行う手法を提案する。ここで用いる積層圧電アクチュエータは精密機械のバルブ開閉などに使われており、構造物の振動試験に用いる起振機としての例はなく、高周波数振動を起こして高次の振動特性にも着目できると考えられる。本論文では鋼材接合部の損傷などによる結合状態を損傷状態と考え、ボルトの弛緩状態を評価する実験・解析について検討した。実験は鋼材供試体に積層圧電アクチュエータを設置して局部微小振動を与え、鋼材供試体の加速度測定をする振動実験を行い、供試体の振動特性変化を捉えることによりボルト接合部の緩みを評価するものとした。また、実験供試体のボルト接合部をバネ要素としてモデル化して、有限要素法による固有振動解析を行った。このときの実験におけるボルト接合部の弛緩状態を表すバネ要素

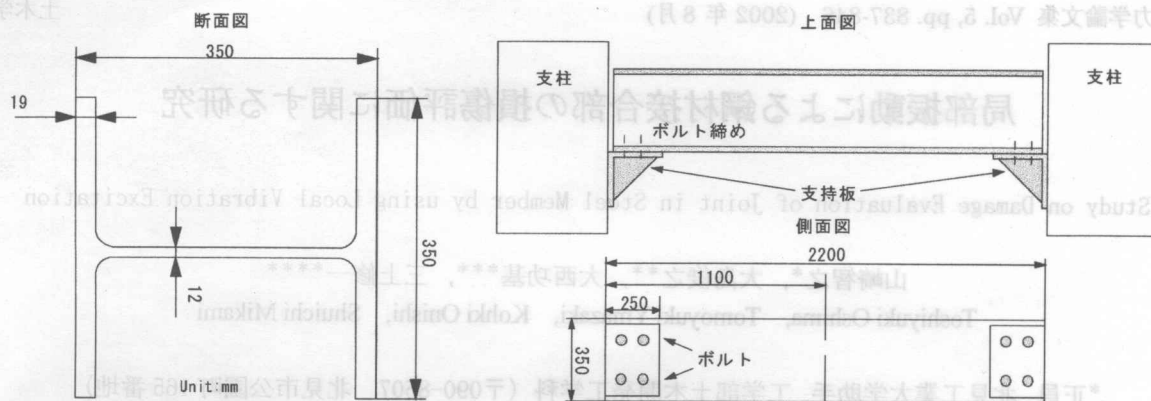


図-1 実験供試体概略図

表-1 アクチュエータ動作部装置の性能

積層圧電アクチュエータ	
外形寸法(W×T×H)	10×10×20(mm)
動作周波数	0~982Hz
変位量(100V)	12.3μm
発生力	3500N
ファンクションジェネレータ	
周波数設定範囲	0.01μHz~15MHz
最大出力電圧	20Vp-p/OPEN, ±10V/OPEN
ピエゾドライバー	
最大出力電圧	150V

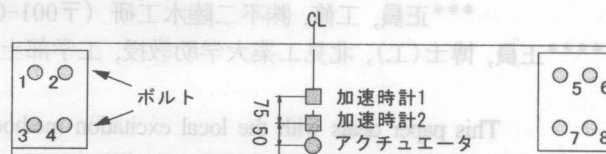


図-2 実験装置設置位置

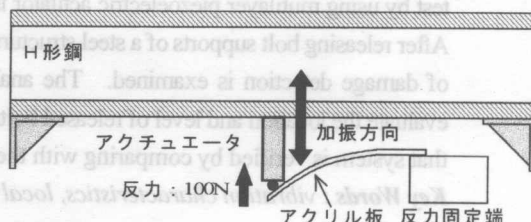


図-3 アクチュエータ設置状況

の剛性を解析的に評価する手法として、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いてバネ剛性の同定を行い、損傷同定の可能性を検討した。

2. 局部加振実験の概要

2.1 実験供試体および装置

(1) 実験供試体

本実験で使用した供試体概略図を図-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、長さは2200mmである。また供試体の左右両側に配置された支柱には溶接で固定されたL字形支持板が設置されており、このL字形支持板とH形鋼端部をボルト8本(片側4本)で接合し、供試体を支持している。H形鋼は支持板のみにより支えられており、両側に配置されている支柱とは接触していない。

(2) 実験装置

実験装置はアクチュエータ動作部とデータ収録部から構成される。

アクチュエータ動作部はアクチュエータが振動する時の加振波形を作成するファンクションジェネレータ、ファンクションジェネレータから出力される電圧を増幅させるピエゾドライバーおよび加振機となる積層圧電アクチュエータから構成される。本実験で使用した装置の性

能を表-1に示す。

データ収録部はノート型パソコン、DAQカード(A/D変換カード)、シグナルコンディショナ、小型半導体加速度計から構成される。使用した小型半導体加速度計の性能は加速度定格容量が±2Gで、応答周波数はDC~400Hzである。

2.2 振動試験方法

本実験は積層圧電アクチュエータで鋼材供試体を加振させ、小型半導体加速度計で加速度測定を行った。アクチュエータおよび加速度計の設置位置は図-2に示す。アクチュエータの設置位置は発生力が微弱であることからフランジ中央に配置すると振動が起こらないためフランジ端部とした。計測システムはシグナルコンディショナとA/D変換カードを介して直接ノート型パソコンで計測データをサンプリングできるものとした。本実験では400Hz程度までの振動数領域を解析対象とすることから、データのサンプリング周波数は1600Hzとした。アクチュエータをそのまま供試体に取り付けて測定した場合、アクチュエータと供試体の質量比がかなり違うので計測できる振動が起きなかった。そのためアクチュエータ自身の振動が供試体に伝わるようにするため、図-3に表したようにアクチュエータに負荷がかかるような反力板を設置して加振を行った。このときのアクチュエータにか

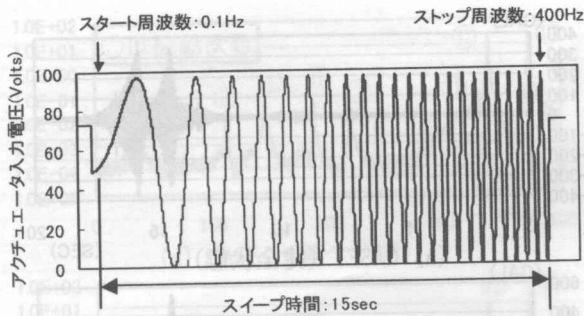


図-4 スイープ加振における出力電圧波形

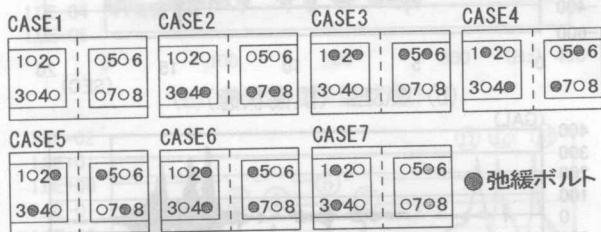


図-5 ボルトを緩めた実験ケース

かる反力は約 100N 程度とした。積層圧電アクチュエータによる振動試験の加振システムは、ファンクションジェネレータにより作成された電圧の任意波形信号をピエゾドライバー(電圧増幅器)により増幅し、アクチュエータを動作させ、供試体の局部を加振するシステムとなっている。アクチュエータの動作周波数の最大値はピエゾドライバーの性能との組み合わせにより決定され、アクチュエータ自体の動作周波数は共振周波数 69kHz の 1/3 程度までは動作可能となっている。本実験で使用したピエゾドライバーとの組み合わせでは、アクチュエータの最大動作周波数は 982Hz となり、供試体を局部的に高次振動で加振することが可能である。また、ファンクションジェネレータはスタート周波数およびストップ周波数を設定して周波数を直線的に連続変化させる sin 波出力が可能であり、本研究ではこの出力による加振方法をスイープ加振と呼ぶこととする。

本実験では始めに供試体の卓越固有振動数を探索するため、出力電圧波形が図-4に示すようなスタート周波数 0.1Hz、ストップ周波数 400Hz、スイープ時間 15sec としたスイープ加振による振動測定を行い、供試体の卓越固有振動数を求めた。次に求められた一定の固有振動数で 10 秒間加振を行い、その後の減衰自由振動測定を行った。

本研究において仮想的な健全状態・損傷状態は次のとおりとした。健全状態は H 形鋼供試体の両端を接合しているボルトをすべて締め付けた状態とし、損傷状態は一部のボルトを緩めた状態とした。図-5に本実験で設定した仮想的損傷状態であるボルトを緩めた実験ケースを示す。本実験での損傷状態としては構造的な変化が大きいと考えられる状態は避け、片側のボルト 4 本全部を緩めるような実験ケースは考慮せず、構造的変化が小さく

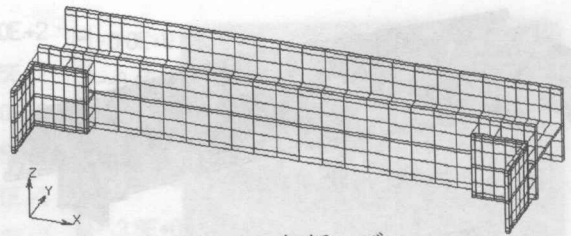


図-6 解析モデル

表-2 CASE1 実験による卓越振動数と固有振動解析結果の比較

モード次数	実験値(Hz)	解析値(Hz)	誤差(%)
1	24.707	24.519	-0.77
2	・	43.326	・
3	113.184	116.516	2.86
4	145.801	156.313	6.73
5	187.762	186.215	-0.83
6	・	211.816	・
7	219.629	213.903	-2.68
8	・	243.161	・
9	・	288.909	・
10	・	302.445	・
11	328.808	324.290	-1.39
12	337.939	338.719	0.23
13	372.750	373.502	0.20

誤差: (解析値-実験値)/実験値 × 100(%)

なるような状態とするため、緩めるボルトは片側接合部で 2 本とし、その 2 本の組み合わせにより数種類の実験ケースを設定した。ボルト締め付け時のトルクは 350N・m とし、一定な値になるようにトルクレンチにより締め付けた。緩めるボルトについては、加振時にがたつきが起こらないようにわずかなトルクを導入した。

3. 実験結果

3.1 健全状態における実験結果と解析値

健全状態(CASE1)での固有振動数、モード形状を把握するため固有振動解析を行った。解析モデルは、図-6に示すような節点数 5164、要素数 675 の 20 節点ソリッド要素によりモデル化を行った。ボルトによる H 形鋼と支持板の接合状態のモデル化はボルトの締結力および H 形鋼と支持板の摩擦力を考慮し、3 方向(X, Y, Z 軸)のバネ要素でモデル化し、回転バネは固定とした。バネ要素は H 形鋼と支持板の接触面の 40 節点に配置した。CASE1 では接触面にボルトの剛性が働いているとし、バネ剛性はボルトのヤング率、断面積、締め付け長さより算出し、 $K_x, K_z = 7.0 \times 10^4 \text{ kN/cm}$ 、 $K_y = 1.9 \times 10^4 \text{ kN/cm}$ とした。

CASE1 のスイープ加振より得られた測点 2 の実験結果および固有振動解析結果を表-2に示す。表の実験値欄における ・ は実験結果に表れなかった振動モードである。解析値と実験値の固有振動数を比較すると、両者の誤差は 0.2%~6.7%とよく一致しており、解析モデルは妥当であると考えられる。しかしながら、実験結果の再現

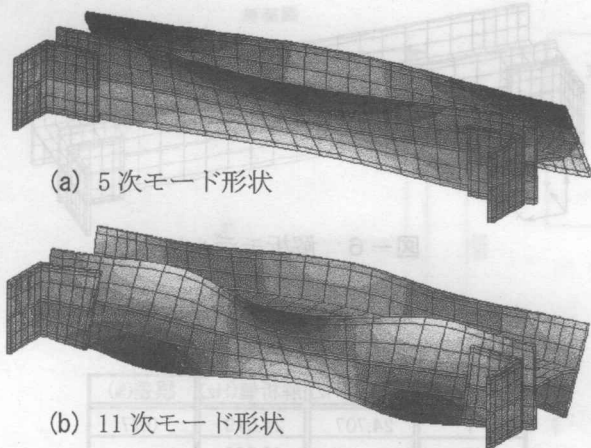


図-7 解析によるモード形状

性を見るためCASE1と同じ条件の実験について、ボルトの締め付け、アクチュエータの取り付けなどを1度はずしてから付け直してCASE1と同じ条件で測定した場合、150Hz以下の低次モード振動数で検出しづらいモードがあった。これは加速度を計測する位置にも関係はあるが、アクチュエータによる加振力が微小で全体系の振動モードが反応しづらく、さらに低次振動モード形状の腹と節の数が少なく、高次振動モード形状では多くなるため高次振動が応答しやすくなると考えられる。またアクチュエータを押す反力が小さい場合、加振力の伝達も小さくなり供試体の低次振動も発生しづらくなるため、低次の検出が困難になる場合があると考えられる。したがって本実験では150Hz以上の高次振動に着目している。

図-7(a)、(b)は解析から得られた5次および11次のモード形状である。どちらもフランジの変形モードが卓越していることがわかる。

3.2 ボルト弛緩状態（損傷状態）の実験結果

(1) スペクトルの比較

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）による実験結果として、実験CASE1～CASE7の測点2で測定された加速度応答波形を図-8(a)～(g)に、パワースペクトルを図-9(a)～(g)に示す。図-9の丸印番号は振動次数を表している。加速度応答波形を比較して見ると損傷状態のCASE3、CASE6の波形には健全状態のCASE1に見られない大きな振動応答があり、ボルト弛緩により健全状態と異なる共振応答を示している。CASE2、4、5、7はあまり大きな変化が見られなかった。これはボルト弛緩位置の違いおよび加速度の測定位置によるものと考えられる。CASE3のボルト弛緩位置は供試体上部側であり、供試体自重により接合部が開くような振動応答が表れたものと考えられる。またCASE6は内側のボルトを緩めたため振動するスパンが長くなり異なった振動特性が表れたものと考えられる。

パワースペクトルにおいてもCASE3、CASE6ではCASE1の11次モード(328.80Hz付近)の卓越スペクトルが視覚

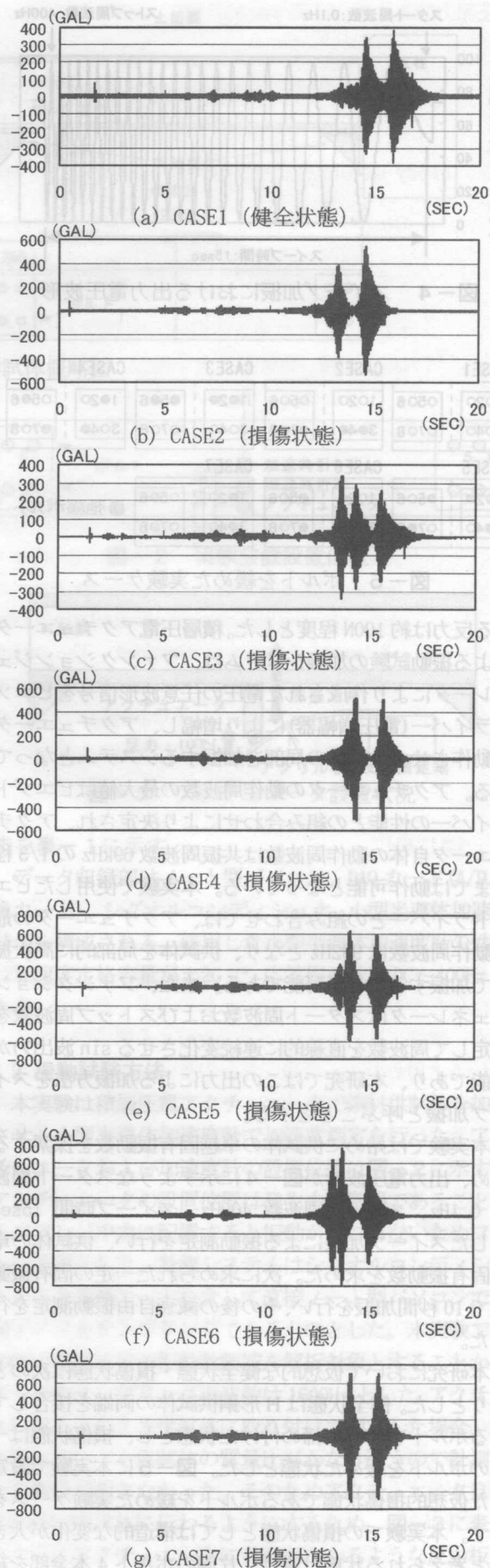


図-8 加速度応答波形

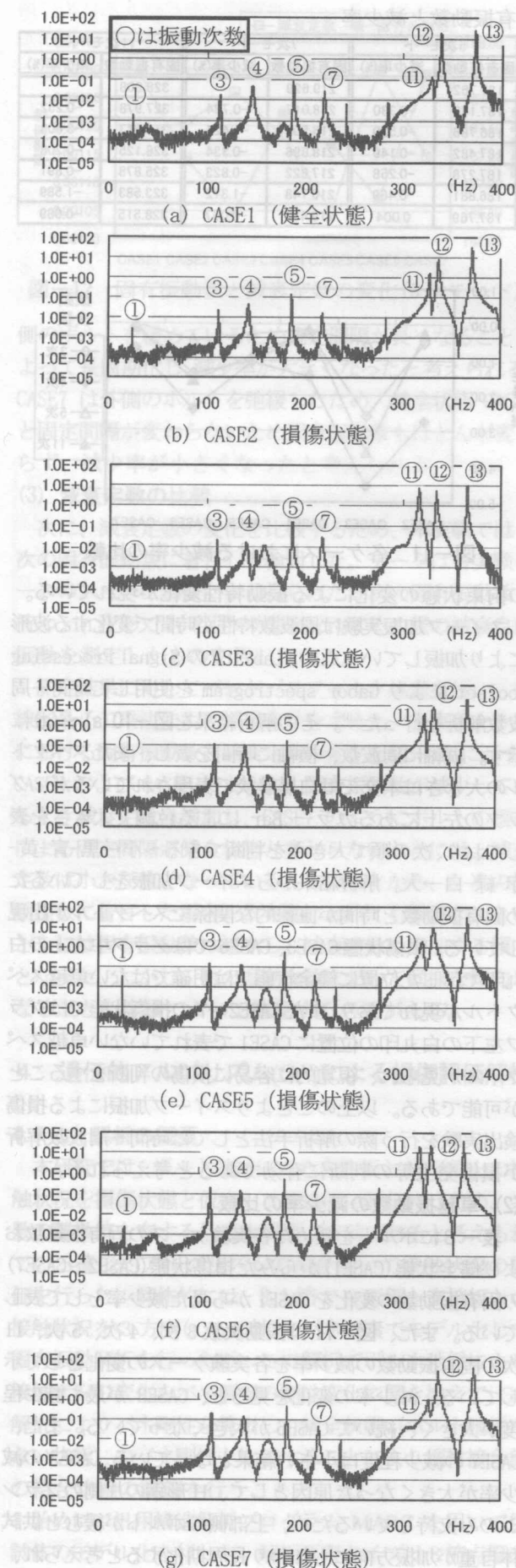


図-9 パワースペクトル

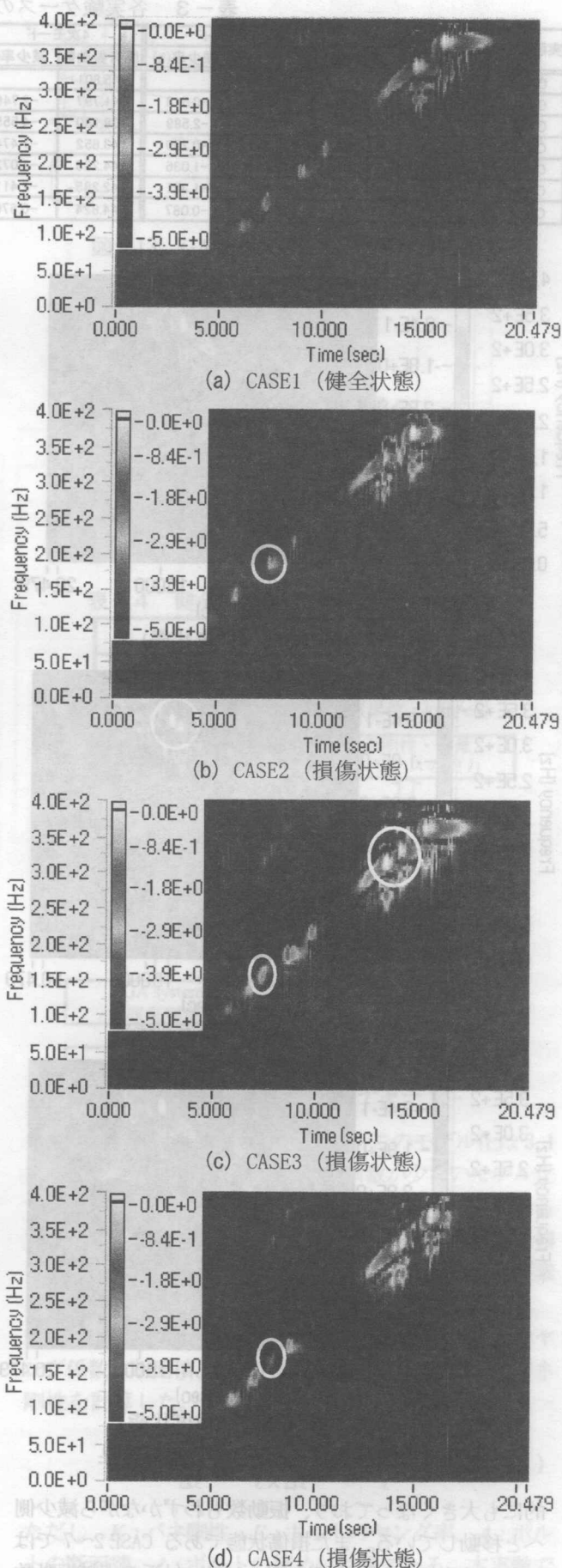
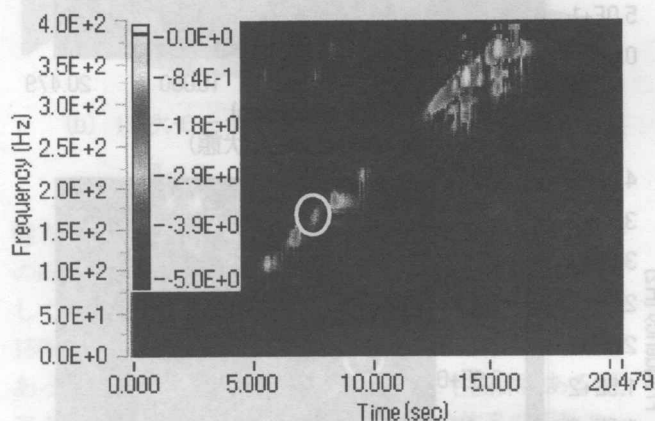


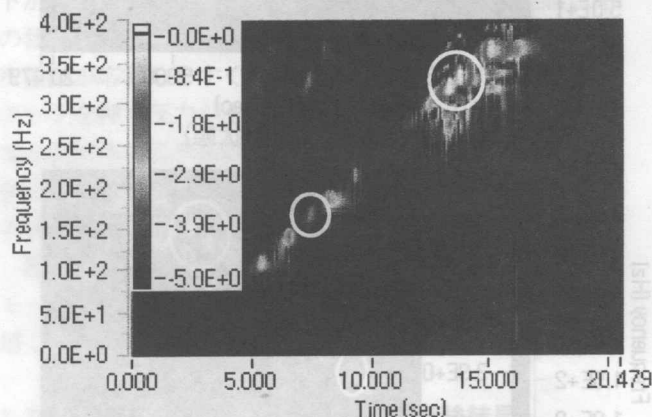
図-10 時間-周波数解析結果

表-3 各実験ケースの固有振動数と減少率

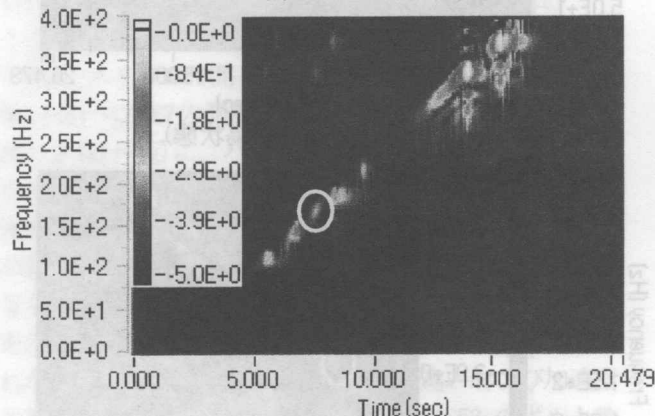
実験ケース	1次モード		3次モード		4次モード		5次モード		7次モード		11次モード	
	固有振動数	減少率(%)	固有振動数	減少率(%)	固有振動数	減少率(%)	固有振動数	減少率(%)	固有振動数	減少率(%)	固有振動数	減少率(%)
CASE1	24.707		113.184		145.801		187.762		219.629		328.808	
CASE2	24.512	-0.790	112.598	-0.518	141.797	-2.746	187.143	-0.330	218.017	-0.734	327.978	-0.252
CASE3	23.535	-4.743	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



(e) CASE5 (損傷状態)



(f) CASE6 (損傷状態)



(g) CASE7 (損傷状態)

図-10 時間-周波数解析結果

的にも大きくなっており、振動数もわずかながら減少側へと移動している。また損傷状態である CASE2~7 では CASE1 ではあまり明確ではない 160Hz 付近の卓越振動数が明確に出現しており、高次振動数領域においてボルト

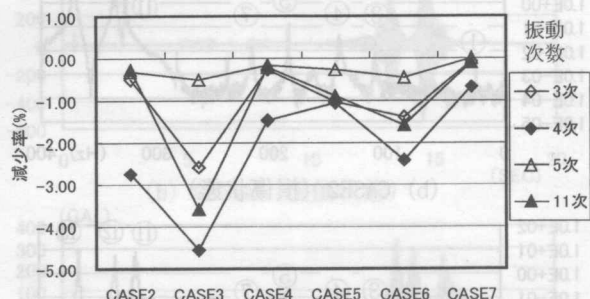


図-11 各ケースにおける減少率の比較

の拘束状態の変化による振動特性変化が現れている。

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³⁾。その解析結果を図-10(a)~(g)に示す。縦軸に周波数、横軸に時間を表し、またスペクトルの大きさは本文では白黒濃淡で表現されているが、グラフの左上にあるカラー Bar による色調で大きさを表しており、次の順で大きさを判断できる~小~黒~青~黄~赤~緑~白~大。解析結果からスイープ加振をしているため固有振動数と時間が直線的な関係でスペクトルが出現している。損傷状態 CASE3、CASE6 ではグラフ中右上の白丸印で示した位置に健全状態では明確ではない卓越スペクトルが現れており、また CASE2~7 の損傷状態ではグラフ左下の白丸印の位置に CASE1 で表れていない卓越スペクトルが見られ、視覚的に容易に損傷の判断をすることが可能である。以上のことよりスイープ加振による損傷検出実験を行う際の解析手法としては時間-周波数解析が損傷発生等の判断に有効であると考えられる。

(2) 卓越振動数の減少率の比較

表-3 にボルトを緩めた各実験ケースの固有振動数および健全状態 (CASE1) からみた損傷状態 (CASE2~CASE7) の固有振動数の変化を CASE1 から見た減少率として表している。また、図-11 は振動次数 3 次、4 次、5 次、11 次の固有振動数の減少率を各実験ケースの変化として示している。減少率の変化を見ると、CASE3 が最も減少程度が大きく、続いて CASE6 が大きくなっている。また、CASE7 の減少程度は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、上部側のボルトが緩むと供試体自重が加振方向にも加わり長周期化すると考えられ、減少率が大きくなったと考えられ、CASE6 は支持板の内

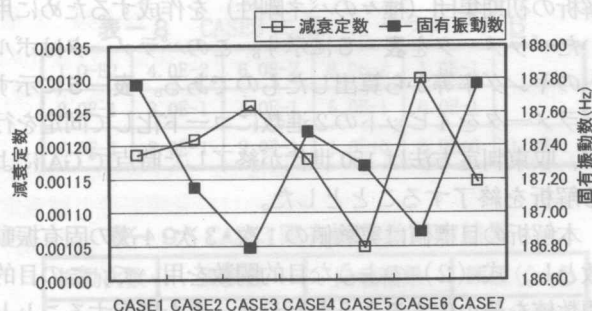


図-12 固有振動数と減衰定数の変化(5次モード)

側のボルトを緩めているため固定間隔が長くなることによって長周期化し、減少率が大きくなったと考えられる。CASE7 は外側のボルトを弛緩したため、健全状態 CASE1 と固定間隔が変わらないため固有振動数もほとんど変わらず、減少率が小さくなったと考えられる。

(3) 減衰定数の比較

次に、減衰定数の変化を比較するため、本実験では 5 次の固有振動数に着目して検討した。データは各実験ケースのスイープ加振により得られた 5 次の固有振動数を持つ sin 波形で 10 秒間の加振を行い、その後の減衰自由振動を測定したものをを用いている。

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-12 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 のようにボルトの緩みによる固定間隔が健全状態と変わらないときには、減衰定数は小さな値となっている。このことから、5 次の振動次数に着目した場合、本実験においても損傷が大きいときには固有振動数は減少し、減衰定数は増加する傾向となった。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. 遺伝的アルゴリズム(GA)による損傷評価解析

4.1 GA 解析の概要

本研究では、ボルト弛緩による支持板と H 形鋼との接触状況を損傷状態と仮定して理論的に評価するため、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)を用いて接触状況の評価を行った。具体的には、3.1 節で H 形鋼と支持板との接触状況を 3 方向(x, y, z 軸)のバネ要素でモデル化して固有振動解析を行ったが、この解析でボルト弛緩による接触状況の変化をバネ要素の剛性変化に置き換えて、GA 解析によりバネ剛性を算出し、健全状態(ボルト弛緩がない状態)のバネ剛性と比較することにより鋼材接合部の結合状態の評価を行うこととした。

始めに、汎用構造解析プログラム MARC を用いて供試体のモデル化を行った。解析要素タイプは 8 節点厚肉シェル要素で、供試体を節点数 157、要素数 40 の要素で

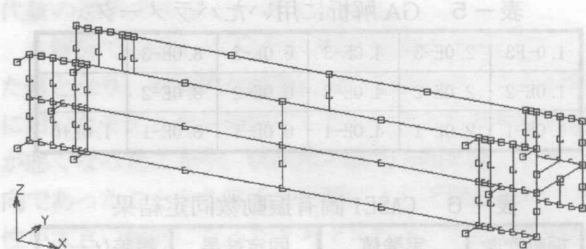


図-13 GA 解析に用いた分割要素モデル

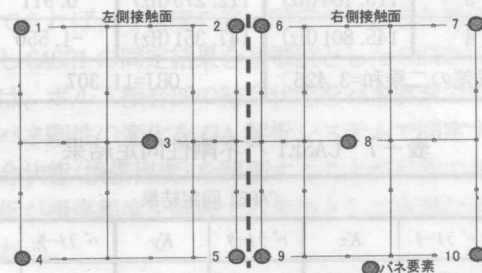


図-14 解析モデルにおけるバネ要素配置図

表-4 健全状態をモデル化したバネ剛性

K_x	K_y	K_z
7.14×10^6	1.94×10^6	7.14×10^6

(単位: kgf/cm)

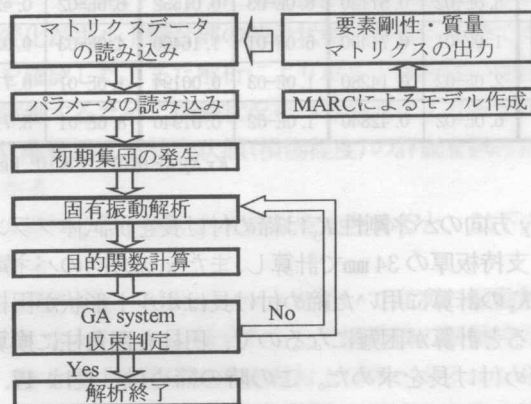


図-15 解析のフローチャート

分割し、バネ要素は 10 節点とした。このモデル化は 3.1 節で行ったモデル化よりかなり要素数が少ないモデル化としたが、これは GA による解析時間が非常に長くなるためである。図-13 に分割要素モデル図を示す。図-14 は H 形鋼と支持板との接触状況をモデル化したバネ要素の配置図で、図中の数字はバネ要素番号を表している。H 形鋼と支持板の接触状況を表すバネ剛性はボルトのヤング係数、断面積、締め付け長から式(1)を用いてバネ剛性を計算した。

$$K = \frac{P}{\Delta \ell} = \frac{E \times A \times \Delta \ell}{\ell \times \Delta \ell} = \frac{E \times A}{\ell} \quad (1)$$

ただし、 K :バネ剛性、 E :ボルトのヤング率、 A :ボルトの断面積、 ℓ :ボルトの締め付け長である。本実験で使用したボルトは直径 20mm、ヤング率 2.1×10^6 (kgf/cm²)

表-5 GA 解析に用いたパラメータ

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-6 CASE1 固有振動数同定結果

振動次数	実験値	同定結果	誤差($f_e - f_a$)
1	24.707 (Hz)	25.147 (Hz)	-0.440
3	113.184 (Hz)	112.273 (Hz)	0.911
4	145.801 (Hz)	147.351 (Hz)	-1.550
誤差の二乗和=3.426		OBJ=11.307	

表-7 CASE1 バネ剛性同定結果

要素 番号	CASE1 同定結果					
	パラメータ	Kx	パラメータ	Ky	パラメータ	Kz
1	2.0E-02	0.14280	6.0E-03	0.01164	8.0E-03	0.05712
2	8.0E-02	0.57120	8.0E-02	0.15520	6.0E-02	0.42840
3	1.0E-02	0.07140	2.0E-01	0.38800	6.0E-01	4.28400
4	6.0E-01	4.28400	4.0E-02	0.07760	8.0E-01	5.71200
5	8.0E-01	5.71200	4.0E-01	0.77600	8.0E-01	5.71200
6	2.0E-01	1.42800	1.0E+00	1.94000	8.0E-01	5.71200
7	8.0E-02	0.57120	8.0E-03	0.01552	6.0E-02	0.42840
8	1.0E-01	0.71400	6.0E-01	1.16400	4.0E-03	0.02856
9	2.0E-02	0.14280	1.0E-03	0.00194	1.0E-01	0.71400
10	6.0E-02	0.42840	1.0E-02	0.01940	8.0E-01	5.71200

Kx, Ky, Kz 単位: ($\times 10^6$ kgf/cm)

で、y 方向のバネ剛性 K_y は締め付け長を供試体フランジ厚+支持板厚の 34 mm で計算し、また x, z 方向のバネ剛性 K_x 、 K_z の計算に用いた締め付け長はボルト形状が円柱形であると計算が困難になるので、円柱を四角柱に換算して締め付け長を求めた。この時の締め付け長は 17.724 mm であった。以上より計算したボルトのバネ剛性を表-4 に示す。

GA 解析によるバネ剛性同定のフローチャートを図-15 に示す。フローチャートからもわかるように固有振動解析を繰り返し計算するので、計算時間等の問題からこの解析に用いた解析モデルは簡略化したモデル(要素分割の少ないモデル)としている。この簡略化したモデルと表-4 のバネ剛性で CASE1 (健全状態) の固有振動解析を行った場合、実験値より若干大きな解析結果となった。これは簡略化した要素分割としたため計算精度が悪くなったと考えられる。このため本論文では始めに CASE1 のバネ剛性を GA 解析で同定し、同定された健全状態のバネ剛性を使用して CASE3 (損傷状態) の同定を行うこととした。

CASE1 の GA 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供試体の接触状況を表現するバネ剛性 30 個とした。GA

解析の初期集団(種々のバネ剛性)を作成するために用いたパラメータを表-5 に示す。このパラメータはボルトのヤング率等から算出したものである。表-5 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。

本解析の目標値は実験値の 1 次・3 次・4 次の固有振動数とし、式(2)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。ここで目標値を低次振動数に限定したのは計算時間を短縮するためである。

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

ここで、 f_e は実験により得られた固有振動数、 f_a 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。

4.2 解析結果

表-6 に CASE1 の固有振動数の同定結果を示す。誤差の二乗和が小さい結果となっており、実験値とほぼ一致している。また表-7 に GA 解析で同定した CASE1 のバネ剛性とパラメータを示す。このバネ剛性を新たな健全状態におけるバネ剛性値として、以降ボルト弛緩状態の解析を行う際の基準値とする。弛緩状態の解析では、パラメータは健全状態のバネ剛性に乘じた係数であり、同定により得られたパラメータは健全状態からの接触力の減少程度を表す値となる。

次に、CASE1 の同定から得られたバネ剛性を用いて CASE3 の接合部分の評価を行う。CASE3 の実験は上部側の 2 本のボルトを弛緩して行っているので、解析でも上部にあるバネ要素番号 1, 2, 3 および 6, 7, 8 における 3 方向のバネ剛性 18 個を同定対象とした。したがって下側にあるバネ要素番号 4, 5, 9, 10 は健全状態 (CASE1, 表-7) と同じであると仮定し、この部分のバネ剛性は固定して解析を行った。

CASE3 の GA 適用方法および収束判定方法は CASE1 と同じ方法とした。始めにパラメータを CASE1 と同じ数値(表-5)を用いて解析を行った。このパラメータで得られた固有振動数の同定結果では 1 次振動数の値が CASE1 の 1 次振動数より大きい値となったため、解析精度を高めるため再度 GA 解析を行った。この時の解析条件は CASE3 で同定したバネ剛性と数値間隔の狭いパラメータ B (表-8) を用いて、再度 CASE3 について GA 解析を行った。その結果を表-9, 10 に示す。

表-9 の CASE3 固有振動数同定結果で、1 次振動数の誤差はまだ大きいですが、3・4 次の振動数は実験値とほぼ等

表-8 CASE3 に用いたパラメータ B

1.0-E2	4.0E-2	6.0E-2	8.0E-2	1.0E-1	
2.0E-1	3.0E-1	4.0E-1	5.0E-1	6.0E-1	
7.0E-1	8.0E-1	9.0E-1	1.0E+0	5.0E+0	1.0E+1

表-9 CASE3 固有振動数同定結果

振動次数	実験値	同定結果	誤差(f_e-f_d)
1	23.535 (Hz)	25.029 (Hz)	-1.494
3	110.254 (Hz)	109.379 (Hz)	0.875
4	139.160 (Hz)	138.814 (Hz)	0.346
誤差の二乗和=3.118		OBJ=9.012	

表-10 CASE3 バネ剛性同定結果

要素 番号	CASE3 同定結果					
	パラメータ	Kx	パラメータ	Ky	パラメータ	Kz
1	2.0E-01	0.02856	2.4E-02	0.00028	5.4E-01	0.03085
2	1.0E-01	0.05712	1.2E-01	0.01862	1.6E-02	0.00685
3	8.0E-03	0.00057	2.0E+00	0.77600	8.0E-04	0.00343
4	1.0E+00	4.28400	1.0E+00	0.07760	1.0E+00	5.71200
5	1.0E+00	5.71200	1.0E+00	0.77600	1.0E+00	5.71200
6	3.2E-03	0.00457	5.4E-01	1.04760	1.0E-02	0.05712
7	1.2E-04	0.00007	7.0E-04	0.00001	4.0E-03	0.00171
8	1.0E-02	0.00714	7.2E-02	0.08381	4.0E-02	0.00114
9	1.0E+00	0.14280	1.0E+00	0.00194	1.0E+00	0.71400
10	1.0E+00	0.42840	1.0E+00	0.01940	1.0E+00	5.71200

Kx,Ky,Kz 単位 : (×10⁶ kgf/cm)

しい結果が得られた。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を固定とし、同定を行わなかったことが原因の一つと考えられる。

表-10はCASE3のGA解析から得られた各節点のパラメータとバネ剛性である。表の網掛け部分の要素番号4,5,9,10はボルトを弛緩していないバネ要素であり、CASE1と同じ値としている。弛緩部分のバネ要素では全体的にx,z方向のパラメータ値が小さい傾向となっている。これはボルト弛緩によって生じた固有振動数減少の要因が支持板とH形鋼の摩擦力減少にあることを示している。また解析結果ではバネ剛性の減少程度が位置によって異っており、H形鋼右側接触面上部側の2箇所の減少程度が大きくなるという結果が得られた。このようにGAによる結合状態評価の解析では接触箇所の同定まではできないが、ある結合範囲での接触程度の違いを把握することができる。しかし要素番号3のバネ剛性Kyの解析結果を比較すると、ボルトを弛緩しているCASE3のバネ剛性の方がCASE1より大きくなるという結果になっている。この要因についての詳細は検討中であるが、要素モデルの簡略化や、GA解析条件のパラメータ、世

代数の選択方法などが考えられる。

本解析でCASE1バネ剛性の解析結果は非常にばらついた値となり、対称的な結果にならなかった。これは解析に用いたモデル化が簡略化したものとしたため計算精度が悪くなったことや、供試体の固定方向が重力と直角方向であったことから自重の影響により下部節点のバネ剛性が大きい傾向になったと考えられる。またGA解析の目的値として1,3,4次の振動次数しか考慮しなかったが、これは計算時間を短縮するためであり、高次振動数まで考慮できればより精度の高い同定ができると考えられる。しかしCASE1の同定結果を基準値としたCASE3の同定結果では、ボルト接合部の結合状態をバネ要素でモデル化し、バネ剛性の変化をGA解析システムで同定することで結合状態(損傷程度)を評価することが可能であり、この解析が損傷程度を評価する手法として有効な手段と考えられる。

5. 結論

本研究は鋼材接合部の損傷による結合状態をボルト接合の弛緩状態と仮定して、ボルトの弛緩状態を評価する手法について検討を行った。本論文では積層圧電アクチュエータを用いて行った局部振動加振実験による振動特性変化がボルト接合部の結合状態の評価に有効であることを確認した。また解析によりボルト接合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解析による結合状態(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結果をまとめると、以下のようになる。

- (1) 積層圧電アクチュエータを用い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、応答加速度波形およびスペクトルから鋼材接合部の接触状況(損傷状態)に対する有意な変化が見られた。また、時間一周波数解析を行うことで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) 本実験では着目する振動次数によって固有振動数の減少程度が異っており、低次振動モードよりも比較的高次振動モードの方が固有振動数の減少率が大きく表れている。
- (3) 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、このような状態が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。
- (4) 解析により、ボルト接合部の接触状態をバネ要素でモデル化し、GA解析を用いることでボルトの結合状態を解析的に評価することが可能であり、接合部の評価手法として有効であることが確認された。

今後の課題として実構造物への適用については、表-1に示すようにアクチュエータの大きさは10×10×20mmで市販の接着剤で容易に設置できる寸法であるが、発生力が小さくアクチュエータを押さえる反力が必要であり、現場での反力板の固定方法を考慮する必要がある。さらにアクチュエータの固定位置の影響、大きな部材への適用性、加速度計の設置位置や設置個数の増加による詳細な評価が必要である。解析においては接合部バネ要素同定の詳細な解析および解析時間の短縮化、損傷位置も判断できるような解析システムの開発など、より客観的な損傷の評価手法を確立していく必要がある。

また、本手法は鋼構造部材の疲労亀裂などによる損傷状態の評価にも有効性があると考えられ、今後亀裂などを想定したモデルについても検討していく予定である。

参考文献

1) 宮本文穂, 森川英典, 山本昌孝: 既存コンクリート橋の損傷に対応する動的挙動の感度特性と損傷評価への適応, 土木学会論文集, No. 442/V-16, pp. 61-70, 1992. 2
2) 岡林隆俊, 山森和博, 田丸康広, 吉村徹: 可搬型振動計測システムによる構造物の振動特性推定, 土木学会論文集, N0591/I-43, pp. 327-337, 1998. 4
3) 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

4) 成田美和子, 大島俊之, 山崎智之, 工藤英雄: 2層ラーメン構造の結合部損傷による振動特性変化の検討, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 57 号, pp. 112-115, 2001
5) 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性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
6) 中川徹, 小柳義夫: 最小二乗法による実験データ解析, 東京大学出版会, 1982.
7) 杉本博之, 鹿汴麗, 山本洋敬: 離散的構造最適設計のための GA の信頼性向上に関する研究, 土木学会論文集, No. 471/I-24, pp. 67-76, 1993. 7
8) 杉本博之, 鹿汴麗: GA におけるパラメータの効果に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 41A, pp. 619-626, 1995. 3
9) 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
10) 北野宏明: 遺伝的アルゴリズム, 産業図書, 1993
11) 杉本博之, 古田均: 遺伝的アルゴリズムの構造工学への応用, 森北出版, 1997.
12) 小山修平, 村瀬治比古, 石田良平: パソコンで学ぶ遺伝的アルゴリズムの基礎と応用, 森北出版, 1997

(2002 年 4 月 19 日)