

# 鋼橋の高力ボルトの軸力推定システム

三上市藏<sup>1</sup>・田中成典<sup>2</sup>・樋渡達也<sup>3</sup>・山浦忠彰<sup>4</sup>

<sup>1</sup>フェロー 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (〒 564 大阪府吹田市山手町三丁目 3-35)

<sup>2</sup>正会員 工修 関西大学専任講師 総合情報学部 (〒 569-11 大阪府高槻市霊仙寺町二丁目 1-1)

<sup>3</sup>学生員 関西大学大学院 (〒 564 大阪府吹田市山手町三丁目 3-35)

<sup>4</sup>三井造船(株) 鉄構建設事業部 (〒 104 東京都中央区築地五丁目 6-4)

高力ボルト自動緩み検知機によって採取される波形データをもとに、ニューラルネットワークを用いて、高力ボルトの軸力を推定するシステムを構築した。本システムは、既設鋼橋の高力ボルト残存軸力を推定する場合のみならず、架設時の高力ボルト導入軸力を検査する場合にも利用できる。

このシステムの実用性を検証するために、実橋のI桁の添接部を想定して、実験模型に対する実験を行って、様々な部位に締付けられた高力ボルトの軸力を推定した。また、実橋の二次部材に締付けられた高力ボルトへの適用も考えて、対傾構を想定した実験模型に対する実験を行って、高力ボルトの軸力を推定した。これら軸力推定結果を使ってシステムの信頼性と実用性を評価した。

**Key Words** : joints of steel bridges, high-strength bolts, inference of axial force, neural network system, pattern recognition

## 1. まえがき

土木工学分野においては、既存の構造物を維持管理するための保全業務の重要性が指摘されてきた<sup>1)</sup>。特に、鋼橋では、添接部の高力ボルトに緩みが生じている、という現場点検報告が多数ある<sup>2)</sup>。そのため、高力ボルトの緩みに関する様々な研究<sup>3)-11)</sup>が行われている。まず、17年供用された歩道橋の高力ボルトの残存軸力が低下することを明らかにした研究<sup>3)</sup>、高力ボルト継手に対してすべり係数とボルト軸力について経時的に調査を行い、軸力減少の過程を明らかにした研究<sup>4)</sup>、振動下における普通ボルトの緩み特性を分析した研究<sup>5)</sup>、ボルトに繰返し衝撃を与えて緩みの機構を明らかにした研究<sup>6)</sup>がある。これらの研究<sup>3)-6)</sup>から、高力ボルトは、供用下で軸力が低下し、次第に緩むことが確認された。緩みを未然に防ぐ方法はまだ確立されておらず、高力ボルトの落下による第三者への影響や継手部の耐荷力の低下などの二次災害を防ぐためにも、高力ボルトの点検は非常に重要である。

従来から高力ボルトの点検には、作業の効率と経済性を考えて、熟練技術者の勘に頼ったハンマによるたたき点検が採用されている。この原始的な方法によれば、ボルトの緩み検出率がある程度の精度で、得られることは報告<sup>7)</sup>されているが、残存軸力の正確な大きさまでは分からない。的確な点検業務を遂行するためには、供用状態にある高力ボルトの残存軸力の大きさを測定する必要がある。そのため、熟練技術者に限らず誰でもが手軽に高力ボルトの軸力を精度良く測定でき

る測定機器を開発し、現状の点検業務を改善することが望まれている。

これらのニーズに対応して、ひずみゲージを用いた軸力測定法に関する研究<sup>8)-10)</sup>が行われた。文献8)は、ボルト軸部に貼付したひずみゲージと埋め込みゲージとから軸力を精度良く算出できることを明らかにしている。文献9)は、埋め込みひずみゲージによる軸力測定法に関して、ゲージの埋め込み位置について検討し、実用性があることを明らかにしている。文献10)は、ねじ締結部への応力波の伝播から、応力波のモードと締付け度合、緩み度合との関係を明らかにし、応力波をモニタリングすることで緩みを監視する方法を提案している。しかし、これらの研究においては、ひずみゲージを用いた測定方法が採用されているため、鋼橋に使用されている膨大な本数の高力ボルトの軸力を短時間で推定するには少々問題がある。

一方、自動ハンマで高力ボルトを打撃するだけで、誰にでも簡単に緩みを判定することができる高力ボルト自動緩み検知機<sup>11)</sup>が開発された。これを用いると、自動ハンマの打撃によって生じる反発力波形と加速度波形の特徴から、高力ボルトが緩んでいるか、いないかを判別できる。その判定はおよそ10tfを境に行われる。しかし、この検知機は、軸力の大きさを定量的に評価できない。そこで、著者らは、この検知機によって得られた波形データをもとに、ニューラルネットワークがもつパターン認識機能を利用して、高力ボルトの残存軸力または導入軸力の大きさを推定するシステムを構築<sup>12),13)</sup>してきた。

ニューラルネットワーク技術は、入力と出力の値は分かっているが、相互の関係が不明瞭な問題に対して有効である。我国では、土木工学の種々の分野で多数の応用研究<sup>14)~27)</sup>がなされている。

橋梁工学の分野では、橋梁の美的評価項目の処理に適用した研究<sup>14)</sup>、橋梁景観設計に対する有益な情報取得のためのシステム<sup>15)</sup>、鋼橋疲労亀裂の点検リスト提示のエキスパートシステム<sup>16)</sup>、鋼橋疲労損傷の補修方法選定システム<sup>17)</sup>、鉄筋コンクリート床版の補修工法選定システム<sup>18)</sup>、コンクリート橋診断システム<sup>19),20)</sup>に関する研究がある。土質・岩盤力学の分野では、地熱資源有望地域選定システム<sup>21)</sup>、NATM施工時における支保パターン選定システム<sup>22)</sup>、斜面崩壊予測システム<sup>23)</sup>に関する研究がある。土木計画の分野では、資源配分問題の組み合わせ最適化手法の検討<sup>24)</sup>がある。材料工学の分野では、コンクリートの促進中性化と練り混ぜ試験の結果のモデル化<sup>25)</sup>、プロジェクト型塗装管理システムの構築<sup>26)</sup>、コンクリートの品質の推定と感度解析の結果を使った最適化手法<sup>27)</sup>に関する研究がある。

諸外国においてもニューラルネットワーク技術を用いた研究<sup>28)~33)</sup>が行われている。橋梁工学の分野では、構造解析支援システム<sup>28)</sup>、鋼橋疲労損傷発見システム<sup>29)</sup>、鋼橋疲労損傷に関する損傷度判定システム<sup>30)</sup>、土質・岩盤力学の分野では、PC杭の打ち込み時における損傷診断システム<sup>31)</sup>、河川工学の分野では、河川の流量予測システム<sup>32)</sup>、エンジニアリングの分野では、建設業マネジメントツールとしての意志決定支援システム<sup>33)</sup>がある。

著者らが構築したシステム<sup>12),13)</sup>では、入力値として自動ハンマの打撃によって得られる反発力波形と加速度波形データを、出力値としてひずみゲージによって測定されたひずみを軸力値(tf)に換算したものをを用いて、入力値と出力値とをニューラルネットワーク技術を用いて関係付けている。このシステムを用いると、供用中の鋼橋の高力ボルトの残存軸力や架設時の高力ボルトの導入軸力を容易に測定できる。

本研究では、第2章でこれまでの研究<sup>12),13)</sup>で明らかになったことを概説する。そして、積み残した課題として、システムに及ぼす高力ボルトの締付け長さの影響度を分析する必要性を述べる。第3章では、システムに及ぼす高力ボルトの締付け長さの影響を詳細に分析するための実験を計画・実施し、実験模型における様々な締付け長さの高力ボルトから波形データを採取して、軸力推定の精度を確かめる。第4章では、高力ボルトの締付け長さが軸力の推定に及ぼす影響を考慮するために、入力データに締付け長さの情報を与えるシステム構築方法を考案し、検討する。第5章では、現場では加速度波形をうまく採取できない場合があることを踏ま

えて、反発力波形のみを用いて、実用システムを構築する。このシステムの実用性を検証するために、実橋のI桁の添接部を想定して、実験模型の様々な部位に締付けられた高力ボルトの軸力を推定する。また、実橋の二次部材に締付けられた高力ボルトへの適用も考えて、対傾構を想定した実験模型を製作し、実験を行って、高力ボルトの軸力を推定する。これら推定軸力の精度を検討して、構築したシステムの信頼性と実用性を評価する。

## 2. これまでの研究

著者ら<sup>13)</sup>は、図-1に示すような鋼I桁橋の添接部を想定した実物大の模型を製作し、自動ハンマによって高力ボルトを打撃して得られた反発力波形と加速度波形を用いて軸力の大きさを推定するシステムを構築してきた。対象とする高力ボルトの規格は、鋼橋で良く用いられるF10T(M22)である。本章では、高力ボルトの軸力推定の流れを概説するとともに、これまでの研究<sup>12),13)</sup>で得られた成果をまとめ、システムを実用的なものにするための課題を明らかにする。

### (1) 実験概要

#### a) 実験模型と実験装置

実験模型と実験装置を図-1に示す。実験模型は、鋼I桁の添接部を想定した実物大のもので、実験装置は、高力ボルト自動緩み検知機(自動ハンマ、判別機、ノートパソコンで構成)<sup>11)</sup>と軸力を計るためのひずみ計とスイッチボックス、そして、高力ボルトを締付けるトルクレンチからなる。

試験対象の高力ボルトの軸力の大きさを正確に測定するため、高力ボルトの軸部に2枚のひずみゲージを貼付した。

自動ハンマには、センサが組み込まれており、高力ボルトのナット部を打撃すると、センサにより反発力波形と加速度波形がアナログデータとして採取され、判別機に送信される。判別機は、自動ハンマから送信されてきたアナログデータを1 $\mu$ sec間隔のデジタルデータに変換し、パソコンに転送する。パソコンでは、判別機から送信されてきたデータがディスプレイに表示されるとともに、ハードディスクに自動的に保存される。ディスプレイに表示されるデータは、図-2に示すような反発力(上側)と加速度(下側)の波形で、自動ハンマの打撃直後から1024 $\mu$ secまで1 $\mu$ sec間隔で抽出されたものである。

#### b) 波形データの採取

試験対象の高力ボルトの軸力は、ボルト軸部のひずみを観測しながらトルクレンチで締付けて導入する。所

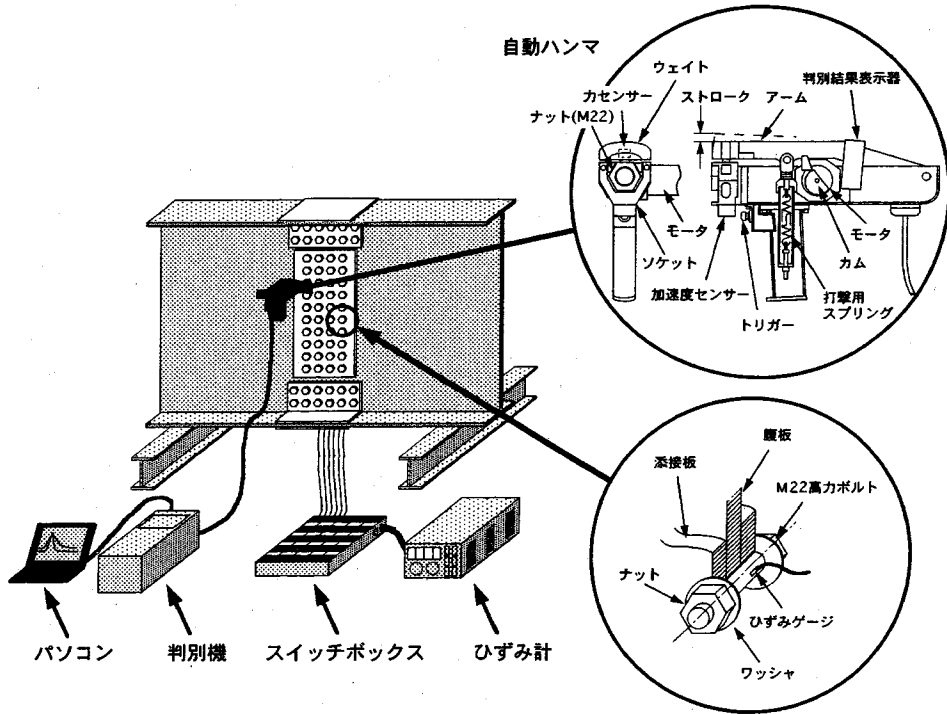


図-1 実験模型と実験装置

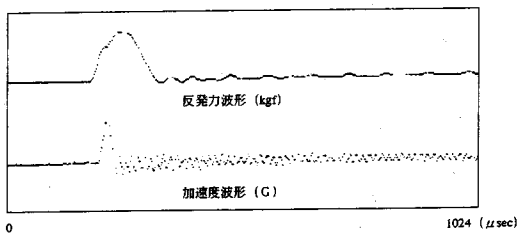


図-2 採取された波形データ

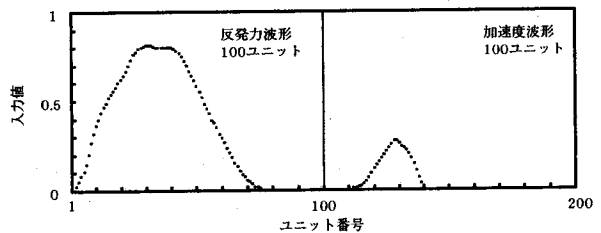


図-3 入力波形データ

定の軸力を導入した後、自動ハンマを用いて1本の高力ボルトについて10回打撃し、後半の5回の打撃で得られた波形データを入力データとして採取<sup>13)</sup>する。

試験対象外の高力ボルトは、トルクレンチを用いて、トルクメータの値を読みながら締付けて、所定の軸力を導入する。

## (2) ニューラルネットワーク技術による軸力推定

反発力波形および加速度波形(入力データ)とボルト軸力(出力データ)との関係をニューラルネットワークに学習させることによって、ボルト軸力推定システムを構築<sup>12),13)</sup>した。

システムの構成は、ハードウェアとして富士通製のパソコンFMR-70HL3にニューロボードFM60-191を装着した。ソフトウェアとしては、階層型ニューラルネッ

トワークシミュレータNEUROSIM/L<sup>34)</sup>を利用した。

階層型ネットワーク構造は、波形データを与える入力層と軸力の値を与える出力層の他に、非線形性が強い問題に適するように中間層を2層<sup>12)</sup>とし、計4層とした。原則として、入力層を200ユニット、出力層を1ユニットとした。学習方法には、バックプロパゲーション法を採用した。そこで用いられる学習パラメータには、重みの変化量を大きくする $\epsilon$ 、誤差の振動を減衰させる $\alpha$ 、学習に強制振動を与えて極小解から脱出させる $\beta$ がある。最適な中間層のユニット数と学習パラメータ( $\epsilon$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ )の値は、パラメトリック解析を行って決定した。

文献12)では、採取された波形データをニューラルネットワークに与える前に加工する方法として、入力値を[0,1]の実数値に変換する正規化の方法と、波形のば

らつきを抑えるための平滑化の方法を検討した。その結果、図-2の反発力波形の立ち上がりから200  $\mu$  secまでの間の両波形を2  $\mu$  sec間隔で抽出した後、全波形データの波高を考慮して最大波高を決定し、その最大波高でそれぞれの波形データを正規化し、そして3点平均による平滑化を行えば、システムの推論精度が向上することが分かった。入力波形データの例を図-3に示す。入力層には、反発力波形と加速度波形を最大波高で正規化したデータを1次元データとして、それぞれ100ユニットずつの計200ユニットに与えた。

また、現場では、自動ハンマから加速度波形が常に安定して採取されるとは限らない。そこで、反発力波形のみを用いたシステムも検討した。その場合、反発力波形を立ち上がりから200  $\mu$  secまで1  $\mu$  secで抽出し、それを入力層の200ユニットに与えた。結果として、反発力波形と加速度波形を併用したシステムの方が推論値が若干精度が良かったが、反発力波形のみを用いたシステムでも、十分な精度で推論値が得られた。

### (3) 自動ハンマの調整方法の概説

文献<sup>13)</sup>では、現場で常に信頼できる波形データが採取できるような、自動ハンマの調整方法を決定した。まず、何時でも何処でも誰でもが自動ハンマを調整できるように、持ち運びが可能な自動ハンマ調整用基準モデルを製作し、簡単な調整手順を提案した。

次に、一日の作業で、自動ハンマを用いて高力ボルトを打撃できる最大回数(3000回)に至るまでに採取される波形データをシステムに入力して、高力ボルトの軸力の推論精度を確認し、打撃回数と推論軸力の精度との関係から自動ハンマの調整時期を調べた。その結果、3000回に至るまでは常に正確な推定軸力の値が得られ、一日の作業中に自動ハンマを調整する必要がないことが明らかになった。

結論として、点検作業前に自動ハンマ調整用基準モデルを用いて、提案した調整手順に従って自動ハンマを調整すれば、自動ハンマは終日正常な状態に保たれ、常に信頼のできるデータが採取できることが分かった。

### (4) 構造パラメータと軸力推定の関係

システムに及ぼす実橋添接部の構造パラメータの影響を調べた<sup>13)</sup>。検討した構造パラメータは、ボルト位置、ボルト中心間隔、ボルト列数、部材要素、ボルト配列、ボルト余長、母材と添接板の組み合わせ、ウェブの板厚、フランジの板厚、添接板の板厚、ボルト締付け長さの12項目である。この構造パラメータと推定軸力との関係を調べるために準備した実験模型は、図-4に示すような鋼I桁橋添接部を想定した実物大のものである。同様な模型を合計4体準備し、表-1に示すよ

うな15種類の実験を行った。

実験で採取した波形データを学習データと推定データに分けて、表-2の計画に沿って、構造パラメータが軸力推定に及ぼす影響を調べた。その結果、表-2に整理した構造パラメータは、ほとんど推定軸力に影響を与えないことが分かった。

### (5) 実用システムに向けての課題

これまでに行ってきた研究<sup>12),13)</sup>では、高力ボルトの締付け長さ(板厚の合計)が27~50mmに限られていることから、ほぼ中小規模橋梁の添接部に採用される高力ボルトを対象としていたことになる。よって、中小規模橋梁の添接部の高力ボルトに対して軸力を精度良く推定できることが確認された。しかし、架設中および供用中の橋梁では、高力ボルトの締付け長さが50mmを超える大規模な橋梁が多数あるため、対象としている高力ボルトF10T(M22)の規格で考えられる締付け長さの範囲について分析を行わなければならない。そのため、橋梁の規模と密接な関係がある高力ボルトの締付け長さとの関係を詳細に調べ、実用に耐えるシステムを開発する必要がある。また、システムを広範囲に使えるように、鋼橋I桁の添接部のみならず、二次部材の連結部に適用させることも検討する余地がある。

## 3. 高力ボルトの締付け長さの影響

本章では、高力ボルトの締付け長さが軸力推定に及ぼす影響を詳細に調べるために、新たな実験を計画し、実施し、その結果を分析する。

### (1) 実験計画

呼び径M22の高力ボルトでは、10~120mmまでの部材を締付けることができる<sup>35)</sup>ため、実験は、ほぼ10mm間隔で10~120mmの範囲の締付け長さが得られるように計画した。実験模型は、過去の研究で用いた4体と同構造のもの1体を追加した。締付け長さの実験模型の関係を表-3に示す。

締付け長さの影響を分析するために、全実験模型において板厚を除く形状が同一であるフランジ部を実験対象要素とした。表-3から分かるように、5体の実験模型で可能な限り10mm間隔の締付け長さが得られるように、下フランジと添接板の組み合わせを考えた。厳密には、締付け長さを10mm間隔にできなかったが、締付け長さの影響を調べることが目下の目的であり、締付け長さの若干の違いはシステムに影響を与えないことが分かっている<sup>13)</sup>ため、本章では表-3に示す締付け長さの理想値を使って検討を進めることにする。

表-1 構造パラメータの影響を調べた実験の計画

実験番号	実験模型	対象要素	ボルト列数		ボルト中心間隔 (mm)		配列	板厚 (mm)				ボルト首下長さ (mm)	ボルト余長 (mm)
			鉛直方向	水平方向	鉛直方向	水平方向		ウェブ	フランジ	添接板	合計		
1	2	シャブレット	5	3	100	75	並列	9	—	9,9	27	65	2
2	2	シャブレット	5	3	100	75	並列	9	—	9,9	27	65	2
3	1	シャブレット	5	2	100	75	並列	9	—	9,9	27	65	2
4	1	シャブレット	5	2	75	75	並列	9	—	9,9	27	65	2
5	1	モメントプレート	2	3	120	75	並列	9	—	9,9	27	65	2
6	1	フランジ	2	4	80	75	並列	—	12	9,9	30	75	9
7	3	モメントプレート	2	4	80	75	並列	12	—	9,9	30	75	9
8	1	フランジ	2	4	80	75	並列	—	12	9,9	30	70	4
9	1	フランジ	—	—	50	55	千鳥	—	12	9,9	30	70	4
10	3	フランジ	2	4	80	75	並列	—	22	14,14	50	90	4
11	4	フランジ	2	4	80	75	並列	—	26	12,12	50	90	4
12	1	シャブレット	5	2	100	75	並列	9	—	9,9	27	75	12
13	3	シャブレット	5	2	100	75	並列	12	—	9,9	30	75	9
14	2	フランジ	2	4	80	75	並列	—	17	9,9	35	75	4
15	4	シャブレット	5	2	100	75	並列	12	—	12,12	36	75	3

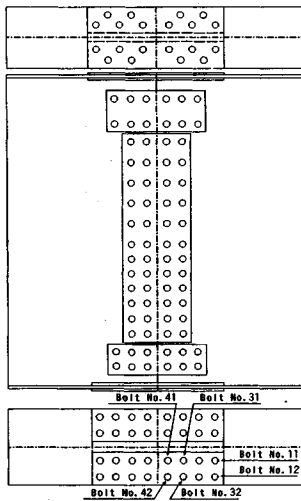


図-4 実験模型1

まず、表-3の実験計画に従って、10~120mmまで10mm間隔で締付け長さを順次設定した。対象としたM22の高力ボルトは、

首下長さ=締付け長さ[部材厚]+40mm[ワッシャ2枚厚+ナット高さ+ボルト余長(6mm±5mm)]

に従って選んだ。このボルトから波形データを採取し、得た波形データを推定データとして、過去に構築したシステム[第2章(4):表-1の実験14で得られた波形データをもとに構築したシステム]に入力する。そして、各締付け長さにおける高力ボルトの軸力推定結果を評価する。

次に、詳細な分析を行うために、表-3で得られた波形データをもとに、各締付け長さに対してその影響を総当たりして評価する。例えば、締付け長さ10mmで得られた波形データを学習データとしてシステムを

表-2 検討したパラメータ

パラメータ	実験番号	
	学習データ	推定データ
(a) ボルト位置	1	2
(b) ボルト中心間隔	3	4
(c) ボルト列数	3	1
(d) 部材要素(シャブレット:モメントプレート)	3	5
(e) 部材要素(フランジ:ウェブ)	6	7
(f) 配列(並列:千鳥)	8	9
(g) 母材と添接板の組み合わせ	10	11
(h) ボルト余長	8	6
(i) ウェブの板厚	12	13
(j) フランジの板厚	6	14
(k) 添接板の板厚	13	15
(l) 締付け長さ	14	10

構築し、10~120mmで得られた波形データを推定データとしてそのシステムに入力し、軸力を推定する。

(2) 学習データと推定データの採取

a) 学習データ

表-3に示す締付け長さが10mmの試験対象の高力ボルトの軸部に2枚のひずみゲージを貼付し、ひずみを観測しながら高力ボルトを所定の軸力トルクレンチを用いて締付けた。導入軸力は、2,6,10,14,18,22.6tfの6段階で設定した。試験対象外の高力ボルトは、トルクレンチを用いて22.6tf(設計軸力20.5tf×安全率1.1)の軸力に締付けた。例えば、図-4のBolt No.11(2次元の座標軸を用いてボルト位置を2桁の数字で表示する。X方向を10の位、Y方向を1の位とする。)の高力ボルトでは、軸力を2tfに設定して、自動ハンマで10回打撃して

表-3 締付け長さに関する実験の計画

締付け長さ 理想値 (mm)	実験模型	対象要素	ボルト列数		ボルト中心間隔 (mm)		配列	板厚 (mm)				ボルト 首下長さ (mm)	ボルト 余長 (mm)
			鉛直方向	水平方向	鉛直方向	水平方向		ウェブ	フランジ	添接板	合計		
10	1	下フランジ	2	4	80	75	並列	12	12	12	50	4	
20	3	下フランジ	2	4	80	75	並列	22	22	22	60	4	
30	1	下フランジ	2	4	80	75	並列	12	9, 9	30	70	6	
40	2	下フランジ	2	4	80	75	並列	17	14, 9	40	80	6	
50	4	下フランジ	2	4	80	75	並列	26	12, 12	50	90	6	
60	2	下フランジ	2	4	80	75	並列	17	35, 9	61	100	5	
70	5	下フランジ	2	4	80	75	並列	40	35	75	120	11	
80	4	下フランジ	2	4	80	75	並列	26	35, 9, 9	79	120	7	
90	5	下フランジ	2	4	80	75	並列	40	14, 35	89	130	7	
100	5	下フランジ	2	4	80	75	並列	40	35, 9, 14	98	140	8	
110	5	下フランジ	2	4	80	75	並列	40	35, 35	110	150	6	
120	5	下フランジ	2	4	80	75	並列	40	35, 9, 35	119	160	7	

後半の5個の波形データを採取する。6,10,14,18,22.6tfの軸力に対しても5個ずつ波形データを採取し、計30個の波形データを得る。同様に、他の5本の高力ボルト(Bolt No.12,31,32,41,42)からもそれぞれで30個の波形データを採取し、合計180個の波形データを得る。これらの波形データを学習データとして、システムを構築する。

表-3の他の11段階の締付け長さ(20~120mm)に対しても同様に180個ずつの波形データを採取し、それぞれを学習データとして、合計12システムを構築する。

#### b) 推定データ

学習データの採取方法と同様に、12通りの締付け長さにおいて、4本の各ボルト(No.11,32,41,42)から各軸力6段階(2,6,10,14,18,22.6tf)の推定データ、計1440(12通り×4ボルト×6段階×5データ)を採取する。

すなわち、12通りの締付け長さそれぞれに対して120個ずつの推定用波形データを採取した。

### (3) システムの構築

表-3の12通りの締付け長さごとに新しく構築するシステムのネットワーク構造は、表-1の実験14の波形データを用いたシステムと同様な4層の階層型で、入力層(200ユニット)、第一中間層(164ユニット)、第二中間層(67ユニット)、出力層(1ユニット)から構成される。学習パラメータの値は $\epsilon=5$ ,  $\alpha=0.4$ ,  $\beta=0$ である。バックプロパゲーション法を採用して学習を行って、12個の新システムを構築した。

### (4) 実験結果

過去のシステム(表-1の実験14. 締付け長さ35mm)に、新たに採取された推定データを入力して、出力される推定軸力の値を調べた。軸力の推定結果の一部を図-5~9に示す。横軸に導入軸力の値、縦軸に推定軸力の値をとった。推定値のばらつきは、低軸力領域で小さく高軸力領域で大きくなる傾向がある。ばらつきは目視で確認できるが、推定結果の定量的な評価を行

うために、図には、全導入軸力(2,6,10,14,18,22.6tf)に対する推定軸力の平均二乗誤差( $\Sigma$ [推定軸力-導入軸力]<sup>2</sup>/個数)を併記した。この値を用いれば、高軸力領域において推定軸力にばらつきがあれば、平均二乗誤差の値も大きくなり、推定精度を的確にとらえることができる。

図中の破線は、波形データをアナログからデジタルに変換するときの誤差と、高力ボルトの軸部のひずみから軸力を算出するときの誤差とを合わせた最大測定誤差を示しており、推定軸力の値がこの範囲内であれば、システムの推論精度は満足できると言える<sup>13)</sup>。

図-5は、締付け長さが10mmの高力ボルトから採取した推定データを同システムに入力した結果であり、導入軸力が10tfを超えるとかなり低い軸力を推定する傾向がある。

図-6は、締付け長さが20mmの高力ボルトから採取した推定データを同システムに入力した結果であり、この場合も、導入軸力が10tfを超えると、やや低めに推定する徴候があるが、全体的に推定精度は良い。

図-7は、締付け長さが50mmの高力ボルトの場合の軸力推定結果を示している。推論精度が良いことから、35mmと50mmのように締付け長さに15mmの差があっても波形はほぼ同じであることが分かる。

図-8は、締付け長さが80mmの高力ボルトの軸力を推定した結果であるが、導入軸力が6tfを超えると、システムは軸力を危険側に評価している。このシステムは、締付け長さの違いが45mmに達すると、その波形を認識できなくなると言える。

図-9は、締付け長さ120mmの高力ボルトの軸力を推定した結果で、導入軸力が6tfで既に10tfを超える軸力を推定している。図-8の結果よりもさらに精度は低い。

以上の結果から、締付け長さが20mm異なると、システムは軸力推定を正常に行えないことが分かる。

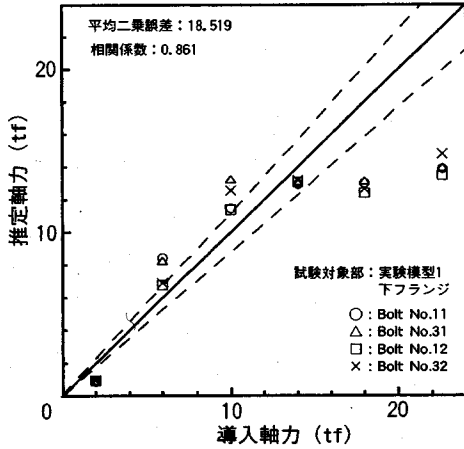


図-5 推定結果(縮付け長さ10mm)

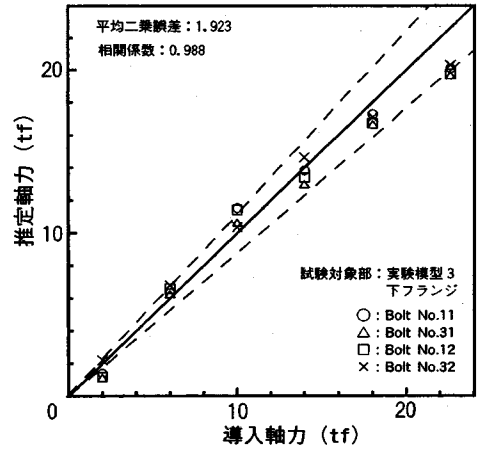


図-6 推定結果(縮付け長さ20mm)

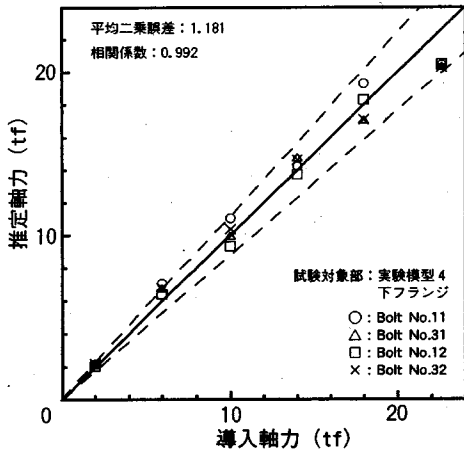


図-7 推定結果(縮付け長さ50mm)

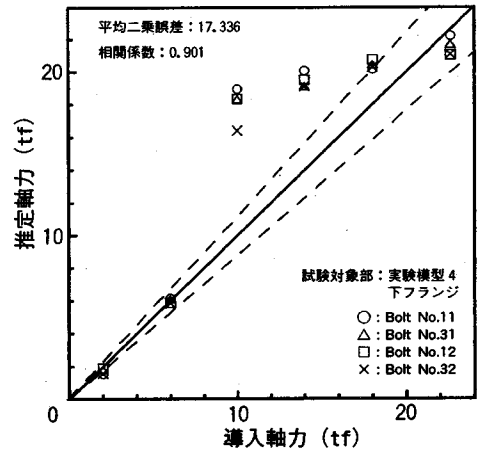


図-8 推定結果(縮付け長さ80mm)

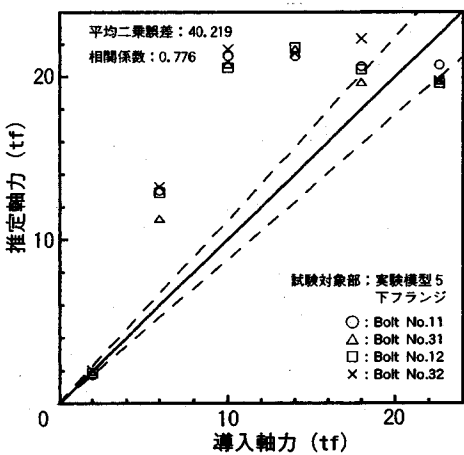


図-9 推定結果(縮付け長さ120mm)

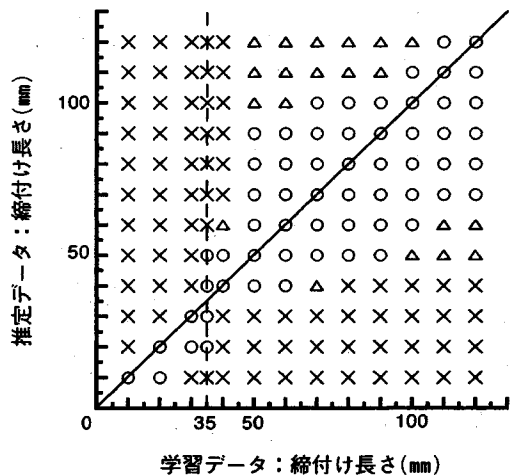


図-10 各システムにおける推定結果

## (5) 考察

縮付け長さやシステムの軸力推定の関係を詳細に調べるために、縮付け長さが10~120mmの高力ボルトから採取した学習データを用いて12システムを構築し、本章(4)で用いた推定データをそれぞれのシステムに入力した。各システムの推論結果を図-10に示す。横軸に学習データを採取した高力ボルトの縮付け長さ、縦軸に推定データを採取した高力ボルトの縮付け長さをとった。図中の○印は、システムの推論精度が良く、縮付け長さの影響が無視できると判断できたもの、×印は、推論精度が低く、明らかに縮付け長さの影響を受けているもの、△印は、影響を受けているが、無視できる程度のものを表す。

破線は、学習データが縮付け長さ35mmで、推定データが10~120mmの場合を表し、その一部は図-5~9の結果である。

斜めの実線は、学習データと推定データの縮付け長さが同じ場合を示している。斜線より上側にある△と×印は、推定軸力値が危険側、斜線より下側の△と×印は、推定軸力値が安全側に推定された結果である。この図からは、高力ボルトの縮付け長さやシステムの推定軸力の関係を考えると、×印、△印が多いことから、高力ボルトの縮付け長さは軸力推定にかなり大きな影響を及ぼすことが分かる。したがって、入力データに、縮付け長さの情報を付加する必要があると判断できる。

## 4. 実用システムの構築方法

これまで開発した軸力推定システムでは、縮付け長さの情報が入力データとして与えられていないので、あらゆる縮付け長さの高力ボルトの軸力を正確に推定するには至らなかった。全縮付け長さの波形データを用いてこれまでの方法でシステムを構築する方法が考えられるが、縮付け長さの情報が多くの情報に埋没して認識されず、システムが軸力を正確に推定できない恐れがある。したがって、入力データに高力ボルトの縮付け長さの情報を与えてシステムを構築する方法を考え、情報の与え方について種々の検討を行って最も有効な方法を決定する。

### (1) 構築方法①

システムの入力データ(波形データ)に縮付け長さの情報を与えるために、波形データを与える200ユニットに、縮付け長さの情報を与える10ユニットを増やして、入力層を210ユニットとする。

#### a) 入力データとネットワーク構造

システムに入力する学習データと推定データには、前章で採取した波形データを再利用する。ここでもシステ

ムの軸力推論精度を比較して最良な構築方法を確立することが目的であるため、縮付け長さとしては表-3に示す理想値を使う。学習データは、10~120mmまでの12通りの縮付け長さの高力ボルトから均一に90個ずつを採った1080個を用いる。推定データは、10~120mmまでの12通りの縮付け長さの高力ボルトから120個ずつ、合計1440データを用いる。

入力データはシステムの入力層に対し、反発力波形データを1~100ユニットに、加速度波形データを101~200ユニットに、縮付け長さの情報を201~210ユニットにそれぞれ与えた。例として、導入軸力が2tfで縮付け長さが10mmと20mmの場合の入力データを図-11に示す。

ネットワーク構造としては、入力層のユニットが増加するため、最適な中間層のユニット数と学習パラメータの値を、パラメトリック解析を行って決定しなおした。入力層210ユニットに対し、第一中間層が160ユニット、第二中間層58ユニット、学習パラメータは $\varepsilon=5$ 、 $\alpha=0.6$ 、 $\beta=0$ となった。

#### b) 軸力の推定

構築したシステムに推定データを入力した結果(縮付け長さが60mmの場合)を図-12に表す。導入軸力に対する推定軸力の平均二乗誤差の値は2.019で、精度が良いことが分かるが、推定値のばらつきが目立つことから、この方法でシステムの実用化をはかるのは難しいと考えられる。しかし、表-4(欄①)に示すように各縮付け長さ別の平均二乗誤差の値を見ると、多少の不安定さはあるが、システムは縮付け長さの情報を認識しながら軸力の推定を行っていると言える。

### (2) 構築方法②

①の方法では、推定値のばらつきが目立ち、推定精度に多少問題があった。縮付け長さの情報の効果を大きくしてシステムの軸力推論精度を高める目的で、縮付け長さの情報を与えるユニット数を40ユニットに増加させて、入力層を240ユニットとした。

#### a) 入力データとネットワーク構造

入力データには、①で用いた波形データを利用する。システムの入力層には、反発力波形データを1~100ユニット、加速度波形データを101~200ユニット、縮付け長さの情報を201~240ユニットに与えた。例として、導入軸力が2tfで、縮付け長さが10mmと20mmの場合の入力データを図-13に示す。

ネットワーク構造は、①と同様に入力層のユニットが増加するため、中間層のユニット数と学習パラメータの値を再決定した。入力層240ユニットに対し、第一中間層が148ユニット、第二中間層60ユニット、学習パラメータは $\varepsilon=5$ 、 $\alpha=0.5$ 、 $\beta=0$ となった。



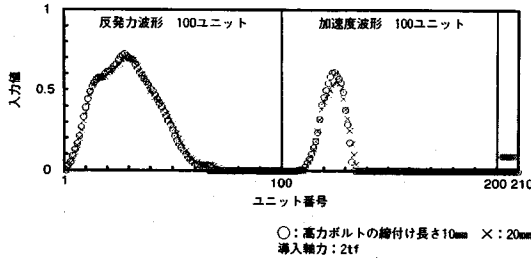


図-11 波形データ (構築方法①)

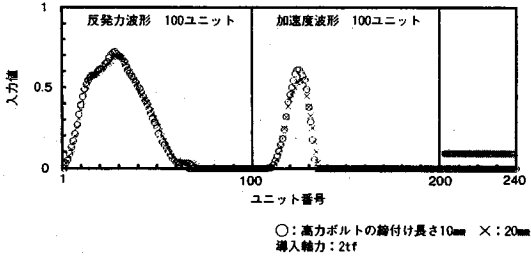


図-13 波形データ (構築方法②)

### b) 軸力の推定

構築したシステムに推定データを入力した結果 (締付け長さが60mmの場合) を図-14に表す。

図から分かるように、推定値にはばらつきがあり、平均二乗誤差の値も2.368で、図-12と同程度の精度である。図-12と図-14の推定値のばらつきの傾向もほぼ同じである。また、表-4に示す全締付け長さに対して、方法①と②を比較しても、それぞれの平均二乗誤差の大きさが類似していることが分かる。このことから、締付け長さの情報を入力層に付加しても、これ以上の軸力推定を向上させることができないと考えられる。すなわち、締付け長さの情報を付加するためにユニットを増やす方法は、軸力の推定精度を向上させるための方法として適さないことが分かる。

### (3) 構築方法③

締付け長さの情報を入力層に付加するオーソドックスな方法(①と②)では、精度の良い実用システムを構築するのは難しいことが分かった。そこで、入力層を②と同じ240ユニットとし、締付け長さに応じて波形に位相を設ける方法を考えた。

#### a) 入力データとネットワーク構造

入力データには、①と②で用いた同じ波形データを利用する。システムの入力層において、反発力波形データを1~120ユニット、加速度波形データを121~240ユニットに、締付け長さの情報は位相を設けることによって与えた。すなわち、締付け長さ10mmの場合を基準と

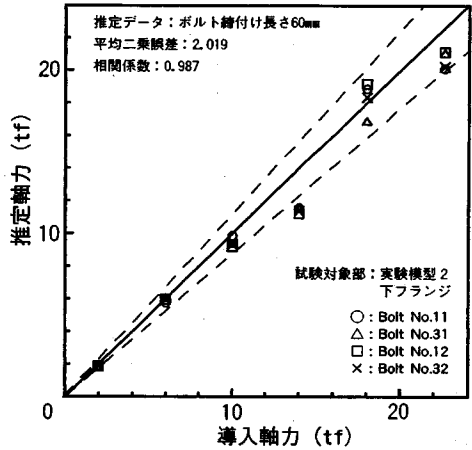


図-12 推定結果 (構築方法①)

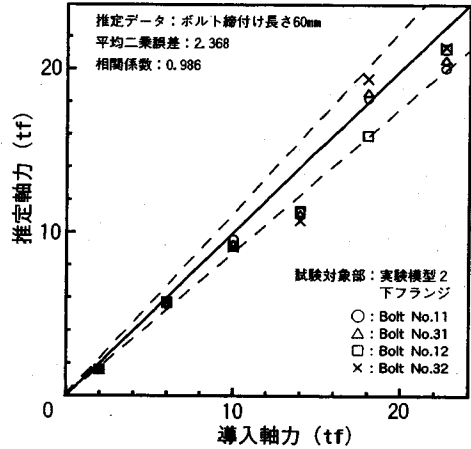


図-14 推定結果 (構築方法②)

して、締付け長さ1mmに対して1ユニットずらすことにした。例として、導入軸力が2tfで、締付け長さが10mmと20mmの場合の入力データを図-15に示す。締付け長さ20mmの波形は、締付け長さが基準の10mmよりも10mm長いので、10ユニットの位相を設けて入力している。

ネットワーク構造としては、入力層のユニット数が方法②と同じであるため、中間層のユニット数と学習パラメータも同じにした。

### b) 軸力の推定

構築したシステムに推定データを入力した結果 (締付け長さが60mmの場合) を図-16に表す。導入軸力に対して遜色のない推定軸力の値が得られており、①、②の方法と比較して推論精度が向上したことが分かる。

他の締付け長さの場合においても、精度の良い推論結果(表-4)が得られた。表-4では、締付け長さ別に、①~③の方法の中で最も平均二乗誤差の値が小さかつ

表-4 締付け長さ別に見た軸力推論精度

システム構築法	締付け長さ (mm) 別に見た全導入軸力に対する推定軸力の平均二乗誤差										
	10	20	30	40	50	60	80	90	100	110	120
①	2.381	0.941	8.775	0.476	4.222	2.019	2.587	4.137	0.662	3.322	2.974
②	2.628	0.924	8.045	0.707	3.973	2.368	7.511	2.980	1.270	3.223	2.851
③	2.527	0.621	2.190	0.500	1.253	1.035	1.990	1.050	2.415	2.232	1.780

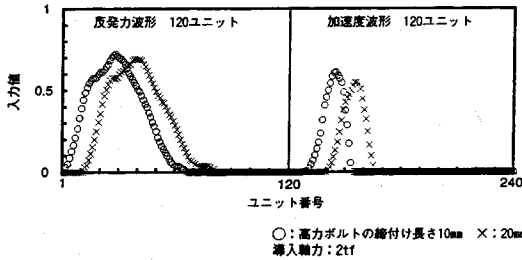


図-15 波形データ (構築方法③)

たものをイタリック文字にしたが、このイタリック文字は方法③に最も多く、方法③が最も良い方法であると考えられる。

(4) 結論

①～③の方法で得られた結果から以下のようなことが言える。

- 1) 高力ボルトの締付け長さの情報を入力層に与えれば、その情報を踏まえながら軸力を推定することが分かった。
- 2) 締付け長さの情報を①と②の方法で与えても、高い精度で軸力を推定し難く、実用システムを構築する方法として適さない。
- 3) 締付け長さに応じた位相を入力波形データにもたせる方法③によると、締付け長さ別の入力波形が的確に認識され、精度の良い推定軸力が得られた。したがって、実用システムの構築には本手法を用いる。

5. 実用システムの構築と評価

本章では、実用可能な高力ボルトの軸力推定システムを構築する。ここでは、現場の様々な条件下では信頼できる加速度波形が採取されない場合もあることを考慮して、反発力波形のみを用いて軸力推定が可能な実用システムを構築する。

システムの実用性を検証するために、実橋 I 桁の添接部を想定して、実験模型(試験体 1～5)の様々な部位に締付けられた高力ボルトの軸力を推定する。また、

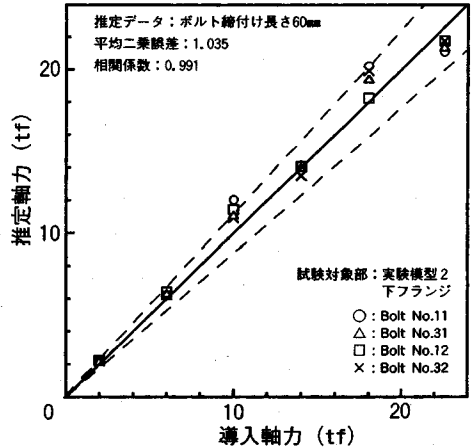


図-16 推定結果 (構築方法③)

実橋の二次部材に締付けられた高力ボルトへの適用も考えて、図-17の実験模型を追加製作し、実験を行って、この場合の高力ボルトの軸力を推定する。最後に、軸力推定精度を確認してシステムの信頼性と実用性を評価する。

(1) 実用システムの構築

システムの構築にあたって、ネットワークモデル、学習パラメータ、学習方法、学習データ数、学習データの入力方法は次のようにした。

- 1) 入力データ 反発力波形のみを用いる。
- 2) ネットワークモデル 入力層、第一中間層、第二中間層、出力層の4層からなる階層型で、それぞれのユニット数は前章方法③と同じく240, 148, 60, 1とした。
- 3) 学習パラメータ  $\epsilon, \alpha, \beta$  の値も前章方法③と同じ5, 0.5, 0にとった。
- 4) 学習方法 バックプロパゲーション法を採用した。
- 5) 学習データ数 表-3の締付け長さ10～120mmの高力ボルトから採取した2160個のデータを、表-5に示すように導入軸力と締付け長さの値のそれぞれ

表-5 締付け長さと導入軸力別に見た学習データ数

	締付け長さ (mm)														合計
	12	22	30	40	50	61	75	79	89	98	110	119			
導入軸力 (tf)	2	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	360
	6	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	360
	10	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	360
	14	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	360
	18	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	360
	22.6	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	360
合計	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	2160	

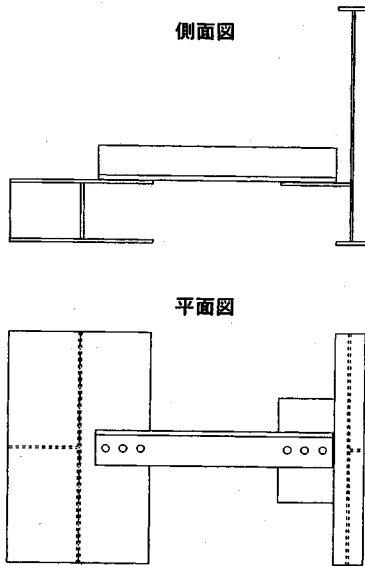


図-17 実験模型6

で均一になるように、2,6,10,14,18,22.6tfの6段階の導入軸力について各段階360データ、また、10~120mmの12通りの締付け長さについてそれぞれ180データとした。

- 6) 学習データの入力方法 高力ボルトの締付け長さに応じて波形データに位相を設けて入力層に入力する。ここでは、実用システムを構築するので、位相は、表-5に示す実際の締付け長さに対するデータとして位相を設け、入力した。図-18に示すように反発力波形のみの200  $\mu$  secのデジタルデータを1  $\mu$  sec間隔で抽出し、位相を設けた波形を240ユニットに割り当てた。

以上の条件の下でシステムを構築した。

## (2) システム検証のための推定データ

システムの実用性を評価するために、実橋の様々な構造条件の下に存在する高力ボルトについて軸力を推定する。そのため、実験模型の様々な部分を締付ける

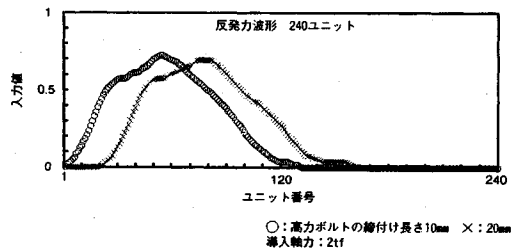


図-18 入力波形データ

高力ボルトから波形データを採取する。ここで、波形データを採取した実験模型の構造諸元の一覧を表-6に示す。模型は6体で、模型1~5は第3章で用いた模型を再度利用し、模型6(図-17)は、対傾構を想定した模型で、等辺山形鋼を用いて、片側をI桁の上フランジに連結し、もう片側を1桁のウェブに溶接されたガセットに連結した。6体の実験模型を用いて24種類の条件で実験を計画した。各実験では、対象要素を締付ける高力ボルトの中から1本を選んで11段階の軸力(2,4,6,8,10,12,14,16,18,20,22.6tf)に順次設定し、それぞれ10回打撃して波形データを採取し、反発力波形のみに位相を設ける処理を行い、24本の高力ボルトの11段階の導入軸力に対して1320個の推定データを獲得した。

## (3) システムの信頼性

システムの信頼性を確認するため、獲得した検証データをシステムに入力し、軸力を推定させた。

まず、実橋I桁の添接部を想定した模型1~5の様々な部位に締付けられた高力ボルトの軸力の推定結果を図-19に示す。大多数の推定軸力は導入軸力に近い。また、推定軸力の平均二乗誤差も小さく、高精度で軸力を推定できることが分かる。

次に、対傾構など二次部材の連結部を想定した模型6(図-17)における高力ボルトの軸力を推定した結果を図-20に示す。この図でも導入軸力とほぼ同じ程度の

表-6 システム検証のための実験の計画

実験番号	実験模型	対象要素	ボルト列数		ボルト中心間隔 (mm)		配列	板厚 (mm)				ボルト	
			鉛直方向	水平方向	鉛直方向	水平方向		ウェブ	フランジ	添接板	合計	首下長さ (mm)	ボルト余長 (mm)
1	1	上モントプレート	2	3	120	75	並列	9	—	9, 9	27	65	2
2	1	上モントプレート	2	3	75	75	並列	9	—	9, 9	27	65	2
3	1	シャーププレート上側	5	2	100	75	並列	9	—	9, 9	27	65	2
4	1	シャーププレート上側	5	2	100	75	並列	9	—	9, 9	27	70	7
5	1	シャーププレート下側	5	2	75	75	並列	9	—	9, 9	27	65	2
6	1	上フランジ	—	—	50	55	千鳥	—	12	9, 9	30	70	4
7	1	下フランジ	2	4	80	75	並列	—	12	9, 9	30	75	9
8	1	下フランジ	2	4	80	75	並列	—	12	9, 9	30	70	4
9	2	上モントプレート	2	4	120	75	並列	9	—	9, 9	27	65	2
10	2	上モントプレート	3	3	120	75	並列	9	—	9, 9	27	65	2
11	2	シャーププレート上側	5	3	100	75	並列	9	—	9, 9	27	65	2
12	2	上フランジ	—	—	50	55	千鳥	—	17	9, 9	35	75	4
13	2	下フランジ	2	4	80	75	並列	—	17	9, 9	35	75	4
14	3	下モントプレート	2	4	80	75	並列	12	—	9, 9	30	75	9
15	3	シャーププレート上側	5	2	100	75	並列	12	—	9, 9	30	75	9
16	3	上フランジ	—	—	50	55	千鳥	—	22	14, 14	50	90	4
17	3	下フランジ	2	4	80	75	並列	—	22	14, 14	50	90	4
18	4	シャーププレート上側	5	2	100	75	並列	12	—	12, 12	36	75	3
19	4	上フランジ	—	—	50	55	千鳥	—	26	12, 12	50	90	4
20	4	下フランジ	2	4	80	75	並列	—	26	12, 12	50	90	4
21	5	上フランジ	—	—	50	55	千鳥	—	30	25, 25	80	120	6
22	5	下フランジ	2	4	80	75	並列	—	40	35, 35	110	150	6
23	6	山形鋼	—	3	—	75	並列	ガセット	フランジ	山形鋼	—	—	—
24	6	山形鋼	—	3	—	75	並列	—	15	15	30	70	6

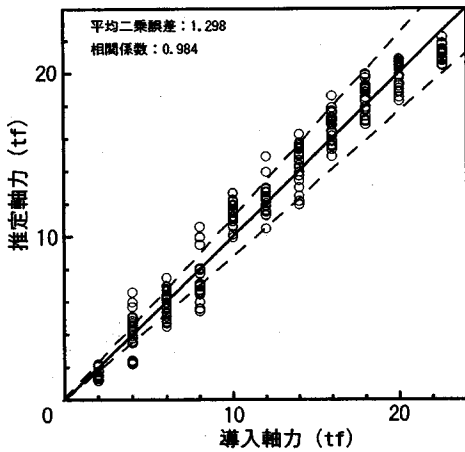


図-19 推定結果(実験模型1~5の高力ボルト)

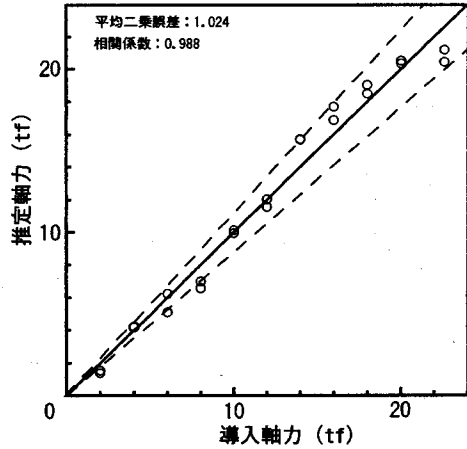


図-20 推定結果(実験模型6の高力ボルト)

軸力が推定されていることが分かる。

本章(1)で構築したシステムは、実橋1桁の添接部に用いられる高力ボルトに限らず、対傾構などの連結部で使用される高力ボルトの軸力も精度良く推定できることが分かる。したがって、構築されたシステムの信頼性と実用性が確認された。

#### (4) 結論

構築したシステムに広範な検証データを入力してシステムの推論精度を調べた結果、推定軸力の値が信頼できることが明らかになった。結論として、以下のことが言える。

- 1) 反発力波形のみを用いて、十分な推論精度をもつ軸力推定システムが構築できたため、現場で加速度波形が採取されなくても高力ボルトの軸力を正確に推定できる。
- 2) 構築した軸力推定システムを用いれば、鋼橋の規模、添接部の構造条件を問わず、高力ボルトの軸力を推定できる。
- 3) 実橋の対傾構など二次部材の連結部にもシステムを適用して、問題なく高力ボルトの軸力を推定できる。したがって、鋼橋全般の高力ボルトの軸力推定が可能である。

- 4) 平均二乗誤差から逆算すると、軸力推定値と導入軸力値との誤差は、平均で±1tf程度であり、システムは高精度で高力ボルトの軸力を推定できる。

## 6. あとがき

著者らは、鋼橋の添接部に使用される高力ボルトの軸力を推定するためのシステムに関する研究<sup>12),13)</sup>を続けてきた。この一連の研究から、軸力推定システムは、実橋のほとんどの構造パラメータに関係なく高力ボルトの残存軸力および導入軸力の大きさを推定できることが分かっていた。ただし、高力ボルトの締付け長さに関しては限られた範囲のみの検討であったので、詳細に分析する余地が残されていた。

本研究では、実用に耐えうる高力ボルト軸力推定システムを開発するために、高力ボルトの締付け長さと同軸力との関係を、新たな実験を行って検討した。その結果、締付け長さがシステムの軸力推定に及ぼす影響は無視することができないほど大きいことが分かった。

そこで、システムが高力ボルトの締付け長さを考慮できるように、高力ボルトの締付け長さの情報をシステムに教える方法について、種々検討を行った。その結果、システムの入力層を240ユニット(反発力波形と加速度波形にそれぞれ120ユニット)とし、波形の位相によって締付け長さの情報を与える方法が、軸力推定の精度が最も高く、満足できる結果を導き出すことが分かった。

以上の結果を踏まえ、軸力推定の実用システムを開発した。ただし、現場では加速度波形が精度良く採取されないこともあることを考慮して、反発力波形のみ用いてシステム化した。

このシステムの実用性を評価するために、実橋を想定して実験模型から採取した種々の波形データを入力した結果、精度の良い軸力が推定でき、システムが実橋に対して有効に適用できることが検証できた。

また、二次部材の連結部に対する実験も行っており、このシステムがこのような連結部に適用できることも明らかにした。

本システムを用いれば、誰でもが実橋の高力ボルトの軸力の大きさを精度良く推定できることが期待できる。著者らは、本システムが高力ボルトの軸力の管理業務を円滑にサポートするものと考えている。

**謝辞:** 本研究を遂行するにあたり、三井造船株式会社の鉄構建設事業部リフレッシュ事業室鹿野顕一室長(現在、鉄構建設事業部技術部長)から多大な支援を賜った。また、同社の山本和利氏に、高力ボルト自動緩み検知

機に関する実験器具の設置から使用方法まで教示頂いた。鉄構建設事業部大阪鉄構部生産技術グループ梅田定雄課長補佐、株式会社三井試験センター大阪出張所高橋功課長補佐には試験体の製作に尽力頂いた。実験の実施、図表の作成には、関西大学工学部学生 八代健太郎君に協力して頂いた。ここに記して、深く感謝の意を表する次第です。

## 参考文献

- 1) 三木千壽: 鋼構造の耐用年数, 土木学会誌, Vol.68, No.10, pp.12-17, 1983.10.
- 2) 鋼構造委員会疲労変状調査小委員会: 鋼橋の疲労変状調査, 土木学会論文集, No.368/I-5, pp.1-12, 1986.4.
- 3) 北郷 薫: ボルト・ナットのゆるみについて, 日本機械学会論文集(第1部), Vol.30, No.215, pp.934-939, 1964.7.
- 4) 谷平勉, 亀井正博, 石原靖弘, 田井戸米好: 17年間供用された高力ボルト摩擦継手のすべり耐力に関する実験, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.36A, pp.1087-1096, 1990.3.
- 5) 谷平勉, 石原靖弘, 指吸政男: 締め付け厚さの大きい高力ボルト継手の耐力特性調整と長期挙動予測, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.39A, pp.1035-1042, 1993.3.
- 6) 扇谷就, 井岡司, 梶原一夫, 菅原一昌: 高架橋梁における付属物の取付け継手部の研究—ボルトのゆるみ特性と長孔—, 橋梁と基礎, Vol.28, No.9, pp.39-46, 1994.9.
- 7) 西村昭, 山崎信之, 加藤修吾, 米谷真二, 神田正孝: 既設高力ボルトの各種非破壊検査の特質, 橋梁と基礎, Vol.17, No.11, pp.26-33, 1983.11.
- 8) 黒田充紀, 広橋渉, 増田陳紀: 2種類のボルト軸部ひずみ測定法の妥当性について, 土木学会論文集, No.441/I-18, pp.193-198, 1992.1.
- 9) 船山義弘, 高見沢光男, 佐々木武三: ボルトの軸力測定方法, 共和技報, No.450, pp.1-5, 1995.8.
- 10) 神宮利夫: ねじ連結部への応力波の伝ばにおける応力波のモードと締付けおよび緩みの関係, 日本機械学会論文集(A編), Vol.61, No.586, pp.254-259, 1995.6.
- 11) 三井造船鉄構土木事業部: 高力ボルト自動緩み検知機, 三井造船技報, No.148, pp.22-28, 1993.2.
- 12) 三上市蔵, 鹿野顕一, 田中成典, 神戸和仁: ニューラルネットワークのパターン認識を応用した鋼橋添接部の高力ボルトの残存軸力推定システム, ファジィ土木応用シンポジウム講演論文集, 日本ファジィ学会, Vol.1, pp.79-89, 1993.11.
- 13) 三上市蔵, 田中成典, 山浦忠彰, 山本和利, 樋渡達也, 宇高輝彦: ニューラルネットワークを用いた鋼橋添接部の高力ボルトの軸力推定システム, 構造物の安全性および信頼性, Vol.3, 日本学術会議, pp.561-568, 1995.11.
- 14) 白木渡, 松保重之, 高岡宣善: ニューラルネットワークによるアーチ橋の景観評価システム, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.37A, pp.687-697, 1991.3.
- 15) 古田均, 大谷祐生, 中林正司, 白石成人: ニューラルネットワークの橋梁景観設計への応用, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.37A, pp.669-675, 1991.3.
- 16) 三上市蔵, 倉地晶, 河合義勝, 神戸和仁: ニューラルネットワークによる鋼道路橋の疲労損傷部位予測システム, 工学と技術, 関西大学工学会, Vol.10, No.1, pp.31-39, 1991.10.
- 17) 三上市蔵, 田中成典, 倉地晶: 鋼橋疲労損傷の補修方法選定のための学習機能のあるニューラルネットワークシステム, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.37A, pp.655-668, 1991.3.
- 18) 渡邊英一, 古田均, 馬野元秀, 賀建紅: RC床版の耐用性評価のためのファジィ・ニューラル・エキスパートシステ

- ム, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.39A, pp.493-502, 1993.3.
- 19) 宮本文徳, 森川英典, 古川正典: 知識更新機能を有するコンクリート橋診断エキスパートシステムの開発, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.38A, pp.543-556, 1992.3.
  - 20) 宮本文徳, 串田守可, 森川英典, 木下和哉: コンクリート橋診断ニューロ・ファジィエキスパートシステムの開発と信頼性の向上, 土木学会論文集, No.510/VI-26, pp.91-101, 1995.3.
  - 21) 白木渡, 安田登, 篠原俊彦, 伊藤則夫: 地熱資源有望地域選定へのニューラルネットワークの適用, 構造物の安全性および信頼性, Vol.3, 日本学術会議, pp.575-582, 1995.11.
  - 22) 荒木義則, 鈴木昌次, 日永田雅司, 古川浩平, 中川浩二: ニューラルネットワークを用いたNATM施工時の支保パターン選定構造のモデル化に関する研究, 土木学会論文集, No.522/VI-28, pp.143-153, 1995.9.
  - 23) 白木渡, 松保重之: ニューラルネットワークによる斜面崩壊予測システムの開発, 構造物の安全性および信頼性, Vol.3, 日本学術会議, pp.569-574, 1995.11.
  - 24) 日高誠, 湯沢昭, 須田熙: ニューラルネットワークによる資源配分を考慮したスケジューリング問題の解法, 土木学会論文集, No.458/IV-18, pp.101-109, 1993.1.
  - 25) 関口司, 魚本健人, 高田良章, 渡部正: ニューラルネットワークを用いたコンクリート実験のデータ解析に関する研究, 土木学会論文集, No.460/V-18, pp.65-74, 1993.2.
  - 26) 掘木賢一, 福田正: ニューロパフォーマンスモデルを用いたプロジェクト型舗装管理システム, 土木学会論文集, No.520/V-28, pp.195-201, 1995.8.
  - 27) 大矢孝, 魚本健人, 堤知明: ニューラルネットワークを用いたコンクリート製造管理システムに関する研究, 土木学会論文集, No.514/V-27, pp.9-18, 1995.5.
  - 28) Rogers, J.L.: Simulating Structural Analysis with Neural Network, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol.8, No.2, 1994.4
  - 29) Szewczyk, Z.P., and Hajela, P.: Damage Detection in Structures Based on Feature-Sensitive Neural Networks, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol.8, No.2, 1994.4.
  - 30) Elkordy, M.F., Ghang, K.C., and Lee, G.C.: Neural Networks Trained by Analytically Simulated Damage States, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol.7, No.2, 1993.4.
  - 31) Yeh, Y., Kuo, Y., and Hsu, D.: Building KBES for Diagnosing PC Pile with Artificial Neural Network, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol.7, No.1, 1993.1.
  - 32) Karunanithi, N., Grenney, W.J., Whitley, D., and Bovee, K.: Neural Networks for River Flow Prediction, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol.8, No.2, 1994.4.
  - 33) Moselhi, O., Hegazy, T., and Fazio, P.: Neural Networks as Tools in Construction, *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, Vol.117, No.4, 1991.12.
  - 34) 富士通: NEUROSIM/L<sup>TM</sup>使用者の手引, 1990.11.
  - 35) 日本工業標準調査会: 摩擦接合用高力ボルト・六角ナット・平座金のセット, JIS B 1186, p.11, 1995.4.

(1996. 1. 16 受付)

## A SYSTEM FOR INFERRING AXIAL FORCE OF HIGH-STRENGTH BOLTS ON STEEL BRIDGES

Ichizou MIKAMI, Shigenori TANAKA, Tatsuya HIWATASHI and Tadaaki YAMAURA

We have constructed a neural network system for inferring axial force of high-strength bolts using wave-shaped data provided by a blow of automatic hammer. Using this system, we can get residual axial force of the bolts on actual bridges under service and installed axial force of the bolts on erection stage.

In this paper, we clear the relation between the property (e.g. grip length) of high-strength bolts and the inferred axial force. By adding the new information with respect to grip length of bolts into the input data of the system, the system could infer the axial force of bolts for various grip length and was tested for practical use in the case of various bolts on the joints and the secondary members.