T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報 Article / Book Information

論題(和文)	 計測波形分析への機械学習適用による高力ボルト軸力の超音波評価 		
Title(English)	Ultrasonic High-Strength Bolt Axial Force Evaluation by Machine Learning-Based to Waveform Analysis		
著者(和文)	 平尾賢生, 鈴木 啓悟, 森田 勝実, 伊藤裕一, 竹谷晃一, 佐々木栄一		
Authors(English)	Kensho Hirao, Keigo Suzuki, Katsumi Morita, Yuichi Ito, Kouichi Takeya, Eiichi Sasaki		
出典(和文)	土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol. 78, No. 1, pp. 108-120		
Citation(English)	Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE)), Vol. 78, No. 1, pp. 108-120		
発行日 / Pub. date	2022, 2		
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は土木学会に帰属します。 Copyright (c) 2022 Japan Society of Civil Engineers.		

計測波形分析への機械学習適用による 高力ボルト軸力の超音波評価

平尾 賢生¹・鈴木 啓悟²・森田 勝実³・伊藤 裕一⁴・ 竹谷 晃一⁵・佐々木 栄一⁶

¹学生会員 東京工業大学 環境・社会理工学院(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1) E-mail: hirao.k.ab@m.titech.ac.jp (Corresponding Author)

²正会員 福井大学准教授 建築建設工学講座 (〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1) E-mail: suzuki-k@u-fukui.ac.jp

 ³非会員 愛知県庁 新城設楽建設事務所(〒441-2301愛知県北設楽郡設楽町田口字川原田 6-18) (研究当時 福井大学 工学部 建築・都市環境工学科)
E-mail: katsumi_morita@pref.aichi.lg.jp

⁴正会員 東京工業大学特任教授 環境・社会理工学院(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1) E-mail: ito.y.ca@m.titech.ac.jp

⁵正会員 東京工業大学特任講師 環境・社会理工学院(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1) E-mail: takeya.k.aa@m.titech.ac.jp

⁶正会員 東京工業大学准教授 環境・社会理工学院(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1) E-mail: sasaki.e.ab@m.titech.ac.jp

高力ボルト接合のボルト軸力は供用中に様々な影響で低下する場合があり,接合の現有性能把握の上で, ボルト軸力を評価することは重要である.これまで,既設ボルトの軸力計測手法は複数提案されているが, 評価精度や適用性の面で改善の余地がある.本研究では超音波計測による方法に着目し,まず得られた波 形にランダムフォレストを用いた機械学習を適用することで,超音波計測波形の初期時間帯にボルト軸力 と関連する情報が含まれる可能性を確認した.さらに評価精度向上のため,ボルト軸力と関連する区間を 選定し,選定区間に寄生的離散ウェーブレット変換(P-DWT)の信号処理を加え,線形回帰による機械学習 を適用することで,ボルト軸力の定量的評価を試みた.その結果,ボルト長さの影響を受けずにボルト軸 力を高精度に評価できる可能性が示された.

Key Words: bolt axial force, ultrasonic test, machine learning, wavelet transform, initial time zone

1. 緒言

多くの構造物に用いられる高力ボルト接合の耐荷性能 は、ボルト軸力、摩擦面の摩擦係数等の影響を受けるこ とが知られている¹⁾. ボルト軸力は締め付け方法によっ て導入軸力がばらつく²こと、締め付け順で前半に締め たボルトが緩むこと、初期ゆるみによるリラクセーショ ンの他、振動や地震などの影響³⁴⁰によって、供用後に も低下する可能性があるという報告がなされている⁷⁺¹⁰. そのため、構造物の安全性を確保する維持管理技術とし て、既設ボルトの軸力を精度よく定量的に評価する手法 の確立が求められている.

現在、ボルト軸力を非破壊的に評価しようとする研究

が多くなされており超音波¹¹⁾⁻¹⁴,打音¹⁵,電気伝導率^{10,17}, 圧電セラミックス^{18,19}などを用いた手法が検討されている.

そのうち、超音波を用いた手法には、ボルト頭部から 送信した超音波が底面から反射して戻るまでの伝搬時間 の変化を利用してボルト軸力を評価する手法²⁰⁾²⁰や、ナ ットを2つの探触子で挟んで計測することによりボルト 内部への音の透過率等からボルト軸力を評価する手法²³⁾ がある.

伝搬時間の変化を利用した手法²⁰⁾²⁰では、ボルトの伸びとボルト軸力に高い相関関係があるとし、ボルト軸力を導入しない場合とボルト軸力導入時との超音波伝搬時間差からボルト軸力を評価する.しかし、ボルト長さに

は製造誤差によるばらつきがあるため、本手法の適用に あたっては計測対象のボルトそれぞれに対し、軸力導入 前の超音波伝搬時間を別途計測する必要がある.また、 ボルト軸先端を平滑に仕上げるなどの配慮も必要である ため²⁴、既設ボルトの軸力評価には用いにくい.

ボルト内部への音の透過率を利用した手法²³では,評価しようとするボルトと同形状・同寸法のボルト・ナットで軸力とナット対面の最短距離における超音波の透過パルスの大きさの関係を予め求めておけば,初期値なしでボルト軸力の評価が可能であり,既設ボルトの軸力評価に適した方法であると考えられる.しかしながら,ナット側面に2つの探触子を設置する必要があり,現場での適用性が良いとは言い難い.

このようにボルト軸力を評価しようとする従来の研究 には、既設ボルト軸力評価の定量化や適用性という面で 課題が残されており、改善の余地がある.

一方,近年,土木工学の分野において,欠陥やボルト 軸力の緩み等を,計測波形,撮影画像,特徴量等を学習 データとした上で,機械学習と組み合わせて判定する研 究が多く行われている.機械学習では,用途に応じてア ルゴリズムを適切に選択する必要があり,例えば,決定 木²⁵,ランダムフォレスト^{20,27},ニューラルネットワー ク(NN)²⁸⁾³⁴,サポートベクターマシン(SVM)^{30,30}などが適 用されている.打音法によるボルト軸力評価においても, いくつかのアルゴリズムについて比較検討した報告³⁷も あるが,超音波と機械学習を組み合わせたボルト軸力評 価手法はこれまで確立されていない.

そこで、本研究ではボルト頭部から超音波を送信する 手法に機械学習を組み合わせることで、十分な評価精度 を持ち、実務での適用が容易な既設ボルトに対応した定 量的ボルト軸力評価手法の構築を目指し検討を行うこと とした.

まず,機械学習を用いて超音波計測波形に含まれるボ ルト軸力と関連する区間を抽出し,その抽出区間に対し てウェーブレット変換を用いた周波数解析を適用させる ことで,抽出区間内からさらにボルト軸力評価の際に重 要な区間を選定した.次に,選定した区間に寄生的離散 ウェーブレット変換(P-DWT)による信号処理を加え,最 後に,信号処理後の波形に線形回帰を用いた機械学習を 適用することで,ボルト軸力評価精度の向上を試みた.

超音波計測におけるボルト軸力と関連する区間の抽出

超音波計測波形に含まれるボルト軸力と関連する区間 を抽出するため、トルクレンチを用いてボルト軸力を導 入しながらボルト軸力を 10kN 毎に計測した. それらの 生波形データを機械学習に適用することで超音波計測波 形に含まれるボルト軸力と関連する区間の抽出を行った.

(1) 計測方法

超音波計測波形に含まれるボルト軸力と関連する区間 を抽出するため、10kN 毎のボルト軸力の超音波計測波 形を取得した.使用した試験体は、実際の高力ボルト接 合を小型モデル化したもので、概要を図-1と表-1に示す. 板厚はボルトの首下長さをもとに設定した. 母材と添接 板の鋼種は SS400, 表面処理は一般的に使われている無 機ジンクリッチペイントとし、ボルトは同一メーカ、同 ーロットのF10TM22を使用した。2つのボルトについて、 ボルト孔(24.5mm)のほぼ中央に配置され、締め付け条件 は同じであるが、機械学習適用の際に教師用とテスト用 に区別するため、図-1に示すように Bolt 1, Bolt 2 と呼ぶ こととする. このような試験体のボルトに対して一探触 子法によりボルト頭部の刻印を避けた状態で、ボルト頭 部頂面から計測を行った. その際, ボルト頭部, 軸部と もに黒皮のままとし、ボルト軸力のリラクセーションを 考慮して、軸力を導入し、探触子設置後1計測あたり5 秒程度で計測を行った. 探触子は1回の計測ごとに取り 外し再度設置して計測を行った.

ボルト軸力は、予め軸力計により軸力とひずみの関係 をキャリブレーションした上で、軸部に貼付した2枚の ひずみゲージにより取得した値の平均値をボルト軸部ひ ずみの真値とし、それをもとにボルト軸力を評価しなが ら、トルクレンチを用いて、ボルト軸力を導入した.な お、ひずみゲージのリード線はボルト頭部に中央を避け た状態で開けた2つの孔から通した(図-2).

超音波探触子は一振動子型垂直探触子を使用した.探 触子の公称周波数は,分解能が高く精度に優れた



表-1 ボルト軸力と関連する区間抽出のための検討ケース

供試体名	母材厚さ [mm]	添接板厚さ [mm]	ボルト首下長さ [mm]
t22	22	22	95
t9	9	16	70

10MHzの狭帯域と、ボルト軸力計測で一般的に使用さ れることの多い 5MHz の広帯域とした.ボルト頭部には ボルト種類や製造元の刻印があるため、刻印に接触しな いように探触子の直径を 14mm とした. 探触子の接触媒 質として探触子の接触箇所にスポイトを用いて一定量の 油(マシンオイル)を塗布した. 探触子の押し当て方によ り、受信信号の大きさや形状が変化することを防ぐため、 図-3のようにばねの付いたクランプで探触子を固定し、 ばねの長さを一定にすることで、一定の力で探触子を固 定することとした. また, 全ての計測でゲインを一定に し、パルスタイプは矩形バースト、パルス周波数は使用 探触子に合わせた 5MHz または 10MHz, パルス波数は5 波、ダンピング抵抗は 100Ω とした. サンプリング周波 数は 100MHz として計測を行った. 使用した一振動子型 垂直探触子は図4のような構造で、圧電素子の両側に貼 り付けた電極にインパルスの電圧を与えることで、素子 が伸縮・膨張し振動する.素子の厚みが薄いほど高い周 波数の振動が発生し、探触子から超音波が送信される. 送信された超音波が界面で反射し、素子に当たり電圧に 変換され、受信器に信号となって取り込まれる.

経年による影響で、ボルト軸力はおおよそ 120kN以上 でばらつくという報告があるため³⁸、本研究では 120kN 以上の範囲を対象とした. 同一メーカ、同一ロットの Bolt 1 と Bolt 2 それぞれのボルトに対してボルト軸力 120kN から 220kN の範囲を 10kN ピッチで 11 段階のボル ト軸力を計測した. また、ボルト軸力毎に各ボルトに対 して 5 回ずつ計測を行った. つまり、各ボルトに対して 55 回ずつ計測を行った.

(2) ボルト軸力と関連する超音波波形の抽出

本研究の提案手法は、既設ボルトの軸力評価を行うため、超音波伝搬時間の情報を利用せず、波形形状からボルト軸力を評価する.そのため、ボルト軸力によって波 形形状が変化している区間の超音波波形を抽出した.

超音波計測波形をいくつかの区間で分割し、各区間の 生波形データに対して機械学習を適用させたボルト軸力 評価を行い、その評価によってボルト軸力と関連する区 間を抽出する.区間は図-5のように設定し、区間1は、 超音波計測波形全体であり、区間2,3はそれぞれボルト 軸底面からの反射波の1回目と2回目である.区間2,3 は反射波の最大振幅値を中心に10MHzの探触子で計測 した場合、4µs間、5MHzの探触子で計測した場合、6µs 間のデータを扱う.区間4は反射波1までのデータ、区 間5は最初の6µsまでの時間帯であり、不感帯と呼ばれ る超音波計測時に発生する発信音の残響を含む初期時間 帯である.

Breiman³⁹はランダムフォレストはNNやSVMなどの他の分類器よりも実装が容易であり、過学習をしない優れ

た評価能力があるとしている.1次元畳み込み演算 ⁴⁰に 基づく深層学習による分類モデル構築も有効な一手段と して考えられるが、本研究においては学習サンプル数が 限定的であること、時刻歴波形などの1次元データはデ ータ拡張がしにくいことから、モデルが過学習する可能



図-2 リード線用穴とひずみゲージ



図-3 実験の様子







図-5 ボルト軸力と関連する区間抽出のための検討区間

性も否定できない. また, 広兼ら 40は, ハンマーで高力 ボルトを打撃し、得られた振動波形データを基に各種パ ターン認識手法により高力ボルトの残存軸力を評価した. ボルト軸力の評価には、NN, SVM, 決定木, ランダム フォレストの4つの機械学習アルゴリズムを用いて評価 精度について検討しており、 ランダムフォレストは多数 の弱識別器を用いて出力を決定するため、最も精度良く 認識できたとしている.

以上の研究を参考にして、 超音波計測波形におけるボ ルト軸力と関連する区間にランダムフォレストを適用し、 ボルト軸力と関連する区間の抽出を行った.

そこで、Bolt1で計測された生波形データを教師デー タ, Bolt2 で計測された生波形データをテストデータと することとした. 検討ケースを表-2 に示し, 各 Case は 図-5と同様5つの区間に分割され、各区間毎に教師デー タとテストデータが 55 ずつあり、それぞれをランダム フォレストによって評価し、その精度を確認した. 以下 に、 ランダムフォレストの概要と評価結果について記す.

a) ランダムフォレスト

ランダムフォレストはアンサンブル学習のバギング⁴⁰ をベースに、ランダムに選ばれた教師データおよび説明 変数から構築される複数の決定木の結果によってクラス 分けを行うアルゴリズムである、バギングとは、教師デ ータから一部のデータを復元抽出しサンプリングするブ ートストラップにより複数モデルを並列的に学習させて いく方法である.ランダムフォレストの概念図を図-6に 示す.

それぞれの決定木は、教師データから重複を許容して ランダムにサンプリングされ、決定木の分岐において誤 分類の確率を低下できる.一方で、教師データを完全に 分類しようとするため、過学習しやすいという欠点があ るが, ランダムフォレストはこの問題に対応している. ブートストラップによりサンプリングデータを複数生成 しているため、それぞれの決定木間では相関が低くなる. また,それらを多数決により分類するため,過学習の影 響を小さくすることが可能である.

b) ランダムフォレストによるボルト軸力の評価

Bolt 1において、ボルト軸力120kNから220kNまで計測 した10kNピッチの波形データとボルト軸力をラベル付 けし学習させ、Bolt 2で計測した波形データのうち検討 ケースの各区間をテストさせ、ランダムフォレストによ り10kNピッチの精度で評価した.なお、波形データは 信号の微細な変化に着目するため, 0.01µsピッチでサン プリングするように設定し、ボルト軸力の評価には Pythonのライブラリsklearn.ensembleのRandomForestClassifier を用いた. 簡易な手法の構築のため、決定木の数は100、 文字列をジニ係数に設定し、その他のパラメータについ ては、デフォルト値とした. 各ケースにおいて評価した

ボルト軸力の正解率を図-7に示す.

すべてのケースで正解率は区間 5, 4, 1, 2, 3 の順に 高かった.最も正解率が高い区間5は、不感帯を含むボ ルト頭部近傍からの反射信号(区間 5)のみが含まれ、約 50%の正解率であった. なお不感帯は送信パルスの幅の

表-2 ボルト軸力評価の検討ケース

Case	探触子タイプ	ボルト首下長さ [mm]	区間
		95	1
			2
А			3
			4
	10MHz狭带域		5
В		70	1
			2
			3
			4
			5
С	5MHz広帯域	95	1
			2
			3
			4
			5



図-6 ランダムフォレストの概念図



図-7 ランダムフォレストによるボルト軸力の評価結果

ために探傷が困難とされてきたため、これまで注目され てこなかった領域である^{43,44}.次に区間4,1の順に正 解率が高く、これらの区間には不感帯を含む初期時間帯 に加え、他の信号も含んでいる.初期時間帯以外の信号 を多く含むほど正解率が低下しているため、区間4,1 の順になったことが考えられる.また、教師データに初 期時間帯を含んでいるケースと比べて、初期時間帯を全 く含んでいないケースは正解率は低く、初期時間帯に比 べてボルト軸底面からの反射波にはボルト軸力と関連す る情報は少ないと考えられる.この結果から、初期時間 帯にはボルト軸力と関連する情報が含まれていると言え る.したがって、本研究では初期時間帯のみである区間 5に着目して検討を進める.

(3) ボルト軸力と関連する情報が初期時間帯に含まれ る要因に関する検討

上記の検討により、ボルト軸力と関連する情報が含ま れるとされる区間5は、6µs までの初期時間帯であるた め、超音波の音速を考慮すると、対象範囲となるのは高 カボルトのボルト頭部のみとなる.したがって、初期時 間帯には主にボルト頭部面近傍からの反射波のみが含 まれているため、ボルト頭部の形状変化がボルト軸力評 価に影響を与えていると考えられる.また、初期時間帯 に着目することで、従来の手法である超音波伝搬時間を 用いないため、既設ボルトの計測に対応していると言え る.

新田ら45の研究では、ボルト軸力導入に伴ってボルト 頭部は変形するとしており、潘ら⁴⁰の研究では、ボルト 頭部ひずみに着目し、ボルト頭部にひずみゲージを貼っ たボルト軸力評価について検討している.しかしながら, ボルト頭部変形に着目した超音波によるボルト軸力評価 の検討は行われていない. そこで、ボルト軸力導入に伴 うボルトの形状変化を明らかにするため, F10T M22 の 高力六角ボルトのねじ部以外を忠実に再現した FE 解析 を行った.有限要素解析ソフトは Abaqus 6.14 を使用した. 解析モデルは、8節点ソリッド要素(六面体要素)とし、 要素サイズは0.8mmとした. 座金とボルト頭部の接触面 でのすべり現象には等方性クローン摩擦モデルを用いて, 摩擦係数をより現実的な0.5⁴⁷とした.ボルトの材料特性 は、降伏応力が 900N/mm²までは塑性ひずみが 0 である モデルとした.鋼材と接触する座金の底面を完全固定と して、ボルト軸部底面を強制変位により引張力を与える ことでボルト軸力を表現した.

図-8に示すボルト軸力 220kN時のボルト頭部の変形図 からも分かるように、底面が水平な探触子をボルト頭部 に設置する場合、探触子とボルト頭部頂面との間に空間 が生じる.探触子は直径 14mm であるため、図-9に示す ボルト首下長さ 95mm と 70mm のボルト頭部頂面変位か ら、ボルト軸力によって探触子とボルト頭部頂面との間 の空間は異なることが明らかになった.また、ボルト首 下長さ 95mm と 70mmの差はボルト頭部の変形量にほと んど影響を及ぼさないことが確認された.

また, 荒川ら⁴⁰は曲面に超音波垂直探触子を設置して 計測した場合, 接触条件が異なり屈折角が変化すると報 告しており, 超音波計測波形の初期時間帯には接触条件 の変化が含まれており, ボルト軸力を評価するための重 要な情報となっている可能性が考えられる.

以上のことから、ボルト軸力を評価する際に重要とな



図-8 ボルト軸力 220kN 時のボルト頭部の変形図 (変形倍率 30 倍)



表-3 初期時間帯の波形分析における検討ケース

Case	使用供試体	探触子タイプ	計測対象のボルト
А	t22	10MHa 並書虛	M22 95mm
В	t9	TOIMINZ 次帝域	M22 70mm
С	t22	5MHz 広帯域	M22 95mm





図-11 (a) うなり波形と(b) 減衰波形の周波数成分(180kN)

る情報は、超音波探触子と高力ボルトの接触部を含む初 期時間帯に含まれている可能性があると考えられる.

3. 初期時間帯波形の分析によるボルト軸力評価 のための区間選定

上記の検討により、ボルト頭部からの超音波計測で得られる計測波形データの初期時間帯にボルト軸力と関連 する区間が含まれていることが確認された.しかしなが ら,初期時間帯にはボルト軸力と関連する区間以外の波 形も含まれているため,ボルト軸力を精度良く評価する ためには,ボルト軸力と関連する区間のみを初期時間帯 内からさらに選定する必要がある.

そこで,超音波計測波形の初期時間帯に着目し,その 範囲の周波数帯を確認した. さらに,その結果を基に, 連続1次元ウェーブレット変換(CWT)により,ボルト軸 力と関連する情報を含む区間のみの選定を行った.

(1) 周波数解析

ボルト軸力評価精度の向上と,既設ボルトの計測に対応したボルト軸力評価手法の確立のため,初期時間帯の 超音波計測波形を分析し,ボルト軸力と関連する区間で の周波数について確認した.

表-3に示す検討ケースから得られた初期時間帯のデー タに着目して分析を行う. 図-10は Case A, B, C における 180kN 時の初期時間帯の生波形データである. Case A と Case B は 10MHz で計測しているため、最初の 0.5µs 間に 5波, CaseCは5MHzで計測しているため、最初の1µs間 に5波を確認することができる.これは、一探触子法で 送受信を行っているため、探触子を駆動する高電圧のバ ースト信号が重なって記録されたと考えられる. そのた め、このバースト波にはボルト軸力と関連する情報は含 まれていないと言える. バースト波のあとに周期や振幅 が不規則となっている波形が確認できる.本研究では, この波形をうなり波形と呼ぶこととする. そのあとは周 期が一定となり、振幅が一定の減衰率で低下している波 形が確認でき、これを減衰波形と呼ぶ. バースト波以降 の波形にボルト軸力と関連する区間が含まれると考えら れるため、その範囲に対して周波数解析を行い、各時間 帯での周波数情報を確認した.

うなり波形と減衰波形の周波数成分は図-11 のように なっており,(b)から減衰波形はいずれのケースも約 4MHz となっていることが確認できる.また,うなり波 形である(a)からは減衰波形の周波数である 4MHz と探触



図-12 CWT 適用後のスカログラム(180kN)

子の中心周波数を含む多数の周波数帯の信号が混在して いることが確認できる. 図-12 は一般的なマザーウェー ブレット(MW)である Gabor を用いて CWT によりプロッ トしたボルト軸力 180kN 時のスカログラムであり、周波 数が 4MHz である減衰波形はうなり波形の途中から生じ ていることが確認できる.うなり波形に 10MHz より大 きな周波数が確認できるが、これは初期時間帯のデータ はパワーが大きく生波形データからも分かるように振幅 がクリッピングを起こしていることが原因である.これ らの周波数解析結果から、減衰波形は常に一定の周波数 であるため、減衰波形にはボルト軸力と関連する情報は 含まれていないと考えられる. 一方で、うなり波形には 多数の特徴成分が含まれていることから、ボルト軸力と 関連する区間は初期時間帯のうなり波形にある可能性が 考えられる.

(2) ボルト軸力と関連する区間(うなり波形)の選定

ボルト軸力と関連する区間であると考えられるうなり 波形のみを選定するため、うなり波形と減衰波形の境界 を決定する方法について考える.うなり始めはバースト 波後とし、Case A と Case B では 0.5µs 後、Case C では 1µs 後とする.

うなり波形のみの選定には減衰波形の周波数を除去す る必要がある. そこで,図-12より,減衰波形の 7MHz より小さい周波数とクリッピングによる 10MHz より大 きな周波数を除いた7MHzから10MHzの範囲でバンドパ スをかけて, CWT を適用した結果, 図-13 に示すスカロ グラムとなった. バースト波とうなり波形の境界近傍は クリッピングが顕著な領域であるが、CWT 適用後も Case A と Case B では 0.5µs, Case C では 1µs で振幅の低下 が確認できたため、クリッピングが生じていることが本 研究の分析手法に与える影響は小さいと考えられる. 水 平破線は各ケースでの振幅のピークとなる周波数を示し ており、その破線上の振幅を正規化して図-14に示す. 図-14 について、時間帯毎の形状を見ると、バースト波 近傍で最大振幅となった後、形状が不規則となり、最後



図-13 バンドパスとCWT 適用後のスカログラム(180kN)

は振幅が急激に減少し、形状もほぼ一定となっている.

そこで、本研究では、図-14 において、形状が不規則 な区間をうなり波形と定義することとし、うなり波形の 終端を設定した.後半部分の形状がほぼ一定となってい る区間において、最初に振幅が90%減少したところをう なり波形の終端と設定した.

4. 初期時間帯のうなり波形に着目したボルト軸 力評価手法の検討

計測波形に含まれる成分のうち、本研究では、時間局 在性のある信号などの微細な特徴を含むと考えられる高



周波成分に着目することで、機械学習の効果向上を図った. 選定したうなり波形の高周波成分を取得するために、 信号処理,特に P-DWT^{49,50}の適用を試みることとした. 定量的にボルト軸力を評価するため、P-DWT により取 得した高周波成分のデータを適用した機械学習により回 帰的にボルト軸力を判定し、そのボルト軸力評価手法の 精度を確認した.各ボルト軸力によって評価精度が異な る可能性があるため、ボルト軸力毎の評価精度について も確認した.この検討では、2.(1)と同様の計測方法で 行った.

以下では、P-DWT を用いた信号処理と、機械学習に よるボルト軸力評価の結果について記す.

(1) P-DWT を用いた信号処理

うなり波形の微細な特徴を含む高周波成分取得のため, 非線形性を有する信号処理に有効な P-DWT による信号 処理を行った. P-DWT とは,実際に計測された波形か ら設計した実信号マザーウェーブレット(RMW)の周波 数特性を従来型離散ウェーブレット変換(DWT)の分解フ ローに周波数領域フィルタとして付加し,特徴信号を取 得する手法である.対象波形と RMW をベースマザーウ ェーブレットでフィルタを付加するレベルまで分解する ため,余分なデータを十分に除去することが可能である.

P-DWT を含む, DWT は対象信号をレベル毎に低周波 側の Approximation と高周波側の Detail の 2 つの成分に分 解することが可能である.本研究により選定した波形は 非定常波形であり、ボルト軸力評価の精度を向上させる ためには、ボルト頭部で生じる微妙な変化を捉える必要 がある.そのため、選定波形の詳細となる Detail 波形に 着目することが重要であると考える.以下,RMW の設 計から P-DWT による Detail 波形の取得までを記す.波形 形状とボルト軸力には線形的な関係は見られないが、各 ボルト軸力で得られる波形の再現性は高い.ここでは、 検討したケースのうち、代表的な波形形状である Case A のボルト軸力が 180kN 時の図を示して述べる.

a) RMW の設計

教師用ボルトで計測し得られた任意の1つのデータを 基に RMW を設計する.

本研究では初期時間帯に含まれるボルト軸力評価に おける重要な区間から特徴信号を取得するため、まず、 図-15の実線で示した対象とする範囲を取り出し、その 取り出した波形に遠方で充分速く0になるような窓関数 を掛ける. 窓関数は時間分解能と周波数分解能の両面で 良好とされる Hanning 窓関数(図-16)を適用した. Hanning 窓関数は次に、前述の処理で得られた実波形について式 (1)でノルムが1となるように正規化することで RMWψ^R を構成する.

$$\|\psi^{R}\| = \left[\int_{-\infty}^{\infty} \psi^{R}(t)^{2} dt\right]^{1/2} = 1 \qquad (1)$$

この RMW は 120kN から 220kN まで 10kN ピッチのボ ルト軸力それぞれで作成した.以上の手順により設計し た RMW を図-17 に示す.

b) P-DWTの適用

P-DWT の計算フローを図-18 に示す. RMW をベース となる MW でフィルタを付加するレベルまで分解し, 得られた低周波成分又は高周波成分の時間波形データを フーリエ変換により周波数領域データへと変換する.こ こで使用するベースマザーウェーブレットは赤池情報量 規準(AIC)により最適なマザーウェーブレットを選択し た5). また、本研究の計測データにおいて、信号処理能 力が最も良好であったことから, RMW を AIC で選択し たMWでフィルタをレベル5まで分解した.得られた実 数部 F_l^R と虚数部 F_l^I の周波数領域データが寄生フィルタ となる.対象となる波形Wを DWT により上記同様のべ ースマザーウェーブレットを用いてフィルタを付加する レベル-1 まで分解する.得られた低周波成分又は高周波 成分の波形データをフーリエ変換したものが実数部PP-1 と虚数部 P_{l-1}^{I} である. P_{l-1}^{R} , P_{l-1}^{I} それぞれに寄生フィル $\beta F_{I}^{R}, F_{I}^{I}$ を用いたフィルタリングにより周波数領域デ ータが得られ、それを逆フーリエ変換することで Approximation 波形と Detail 波形を取得した.得られた2種 類の波形は図-19に示しており、本研究では、選定した ボルト軸力と関連する波形の詳細を基にボルト軸力の評 価を試みるため、Detail 波形に着目する.

(2) 機械学習によるボルト軸力評価

定量的にボルト軸力を評価するため、機械学習により ボルト軸力を回帰的に評価する.まず、学習させる教師 データは波形データとボルト軸力がラベル付けされてい る状態である必要があるため、各波形データにボルト軸 力の情報を与えるクラス分類を行った.次に、クラス分 類によりラベル付けした教師データを学習させて、教師 ありの機械学習を用いた回帰分析^{53,53}によってボルト軸 力を回帰的に評価し、その精度について検討した.回帰 分析は最も一般的な Python のライブラリ skleam の linear_modelを用いた. 簡易な評価手法を提案するため、 設定値はデフォルトとした. 信号処理による精度の変化 を確認するため、検討ケースの教師データとする各対象 範囲において、生波形と信号処理後の Detail 波形とを比 較し検討を行う.以下に、クラス分類と線形回帰につ いて記したのち、その調査結果について記す.

a) クラス分類と線形回帰

表-3の検討ケースにより計測されたデータそれぞれに ボルト軸力のラベルを付けるクラス分類を行った. 図-1 の Bolt 1 に対して各ボルト軸力につき 5 つの教師データ を計測しており,合計 55 の教師データすべてにボルト 軸力のラベル付けを行った.ラベル付けした全てのデー タを学習させ,クラス分類を行った教師データを基に学 習履歴のない Bolt 2 で計測したテストデータからボルト 軸力を機械学習アルゴリズムの線形回帰により評価する. 本研究では複数の説明変数から1つの目的変数を予測 する重回帰分析を行う.重回帰分析は、M次元空間に存 在するデータから予測値を算出する分析手法であり、重 回帰分析のモデルは式(2)のように表される.

$$y = \sum_{m=1}^{M} \beta_m x_m + \beta_0 \tag{2}$$

上式で、 β_m は偏回帰係数であり、最小二乗法により算出し、 β_0 は定数項を表している.1つの説明変数に対して1つの係数を算出し、それらを足し合わせることで予測値を算出する.0.01 μ s ピッチでサンプリングした値それぞれに偏回帰係数を設定し、それらを足し合わせ目的変数を算出する.各変数が目的変数に及ぼす影響を調査することで、10kN ピッチの教師データからピッチ間の数値を予測することが可能である.

b) ボルト軸力評価結果

回帰的にボルト軸力を評価し、その精度を確認するため、実測値(正しい値)と予測値(評価された値)の誤差を 調査することで、本研究での評価手法の精度について検 討した.教師データを生波形とした場合と信号処理後の Detail 波形とした場合とで比較し、検討したケースそれ ぞれの平均絶対パーセント誤差(MAPE)を図-20に示す.

図-20 に示すように、すべてのケースで信号処理後の Detail 波形を教師データとする場合は、生波形を教師デ ータとする場合と比べて MAPE は小さくなることが確認 できた.また、Detail 波形を教師データとする本研究の



図-19 Approximation 波形と Detail 波形(180kN)

提案手法では 120kN から 220kN までのケースについて, MAPE が 6%以下で評価することが可能であることを示 した.

図-21では、教師データを生波形とした場合とDetailとした場合の予想値をプロットした. 閾値として、ボルト軸力220kN時のMAPE6%の誤差を基準に実測値を示す実線と同様の傾きで破線を示した.教師データを Detail波形にした場合の予測値は実測値に充分近い値となっており、P-DWT の信号処理により精度が向上していることが確認できた. 図-21のCaseAではDetail波形を教師データとする場合の220kNの評価が大きく外れているため、

全体の評価精度が低くなっているが、その原因としては、 探触子の設置位置のずれが考えられ、探触子の設置位置 を一定にすることにより、このような大きな誤差を抑え ることができると考える.

Case A と Case B では 10MHz の狭帯域探触子, Case C で は 5MHz の広帯域探触子を使用したが, Case A について 評価誤差が大きかった 220kN を除けば, Detail 波形を教 師データとする場合の MAPE は 0.79%となり, 各ケース の Detail 波形を教師データとする場合の精度は同程度と 言える. したがって,本研究の提案手法において 10MHz の狭帯域探触子と 5MHz の広帯域探触子から送信 するパルス波が評価精度に及ぼす影響は小さいと言える.

Case Aの220kNを除けば、Detail 波形を教師データとす る場合、図-21 における Case A と Case B のすべての評価 が閾値である破線内で評価されていることが確認できる. また、本研究の提案手法は初期時間帯に着目しているた め、ボルト頭部近傍からの信号のみが含まれている.こ れらのことから、ボルト長さは本研究で提案するボルト 軸力評価には影響を及ぼさないものと考えられる.

(3) 教師データと異なるボルト長さのボルトをテスト データとしたときの軸力評価

本研究の提案手法は既設ボルトの計測に対応するため, 初期時間帯に着目しており,ボルト長さの影響を受けに くい手法であると考えられる.そこで, Case A のボルト 首下長さ 95mm を計測したデータを教師データとし, Case B のボルト首下長さ 70mm の計測データからボルト 軸力を評価した.

その結果,図-22 となった.200kN では平均で約 30kN 大きく評価された.また,220kN ではすべて 30kN 以上 大きく評価されたため,図-22 の縦軸の範囲外となって いる.これは,図-21 で示す Case A の 220kN 時の評価の みが大きく外れていることと関係し,Case A のボルト軸 力が 220kN 時の計測の際,探触子の設置位置が若干ずれ ていたことが要因の一つであると考える.200kN と 220kN 以外は 7%以下の誤差で評価できていることから, 探触子の設置位置を合わせることで評価精度の改善が見 込まれる.今後,探触子の設置位置の簡易な調整方法等 について検討する.

5. 結論

本研究では,超音波を用いてボルト頭部から一探触子 法により計測したデータのうち,初期時間帯に着目した 既設ボルトの軸力評価手法を提案した.超音波計測,P-DWT を用いた信号処理,教師あり機械学習の3つを組 み合わせることで,新たなボルト軸力評価手法を構築し, その精度について確認した.得られた結論は以下のよう である.







図-22 95mm ボルトを学習, 70mm ボルトを評価した結果

- ボルト頭部から得られる超音波計測波形データの うち、初期時間帯のうなり波形にボルト軸力と関 連する情報が含まれている可能性が考えられる.
- 2) ボルト軸力導入時の高力ボルトを解析的に調査したところ、ボルト頭部の変形量へのボルト長さの影響は微小であることが確認された.したがって、本研究の提案手法で扱う超音波計測データはボルト頭部近傍で計測される初期時間帯のデータを対象にしているため、本手法はボルト長さの影響を受けにくい手法であると考えられる.
- 3) 本研究の提案手法は同一メーカ、同一ロットのボルトに対して適用させた結果、教師データのボルト長さと同じ場合 MAPE は 6%以下で評価できる可能性を示した.本研究で行った信号処理では探触子の設置位置のずれまでを補正することは困難であったため、教師データのボルト長さと異なる場合,探触子の設置位置を一定にすることで評価精度を向上できる可能性がある.

なお、本研究で行った機械学習は実装容易性を重視し、 簡易な手法として構築するため、回帰モデル上の設定を ほぼデフォルト値としたが、さらなる高精度化において は設定値の検討による改善の余地があると考える.また、 他の機械学習アルゴリズムの適用、異なるメーカやロッ トのボルトへの適用、ボルト孔に対するボルトや座金の 位置が提案手法に与える影響についても検討し、評価精 度の向上を図ることを考えている.

参考文献

- 西村昭:高力ボルト摩擦接合のすべり耐力変動について、土木学会論文報告集、第 187 号、pp.37-47、 1971.3.
- 2) 西村昭,田井戸米好,瀬良茂,穂積重臣,三谷哲 夫:現場締め高力ボルト軸力のばらつきについて, 土木学会論文報告集,第180号, pp.1-9, 1970.8.
- 石原靖弘,小林剛,皆田理,西村宣男:地震被害を 受けた高力ボルト摩擦接合継手の特性調査と繰り返

しすべり実験, 土木学会論文集, No.745/I-65, pp.53-64, 2003.10.

- Wang, F., Ho, S. C. M. and Song, G.: Monitoring of early looseness of multi-bolt connection: a new entropy-based active sensing method without saturation, *Smart Materials* and Structures, Vol.28, No.10, pp.1-7, 2019.
- 5) Marshall, M. B., Lewis, R., Howard, T. and Brunskill, H.: Ultrasonic measurement of self-loosening in bolted joints, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: J. Mechanical Engineering Science*, 2011.
- Jiang, Y., Zhang, M. and Lee, C. H.: A study of early stage self-loosening of bolted joints, *Transactions of the ASME*, *J. Mechanical Design*, Vol.125, pp.518-526, 2003.
- 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接合継手のすべり耐力に 関する実験, 土木学会構造工学論文集, Vol.36A, pp.1087-1096, 1990.3.
- 狩野正人,谷平勉,石原靖弘,小林剛,西尾久:高 カボルト軸力の経年変化に関する実験的研究,土木 学会第 56 回年次学術講演会, I-B162, pp.324-325, 2001.10.
- Temitope, S. J.: Condition monitoring of bolted joints, *Ph.D. Thesis, University of Sheffield,* Sheffield, UK, 2015.6.
- 10) Rafik, V., Combes, B., Daidié, A. and Chirol, C.: Experimental and numerical study of the self-loosening of a bolted assembly, *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing II*, pp.85-94, 2019.
- Miao, R., Shen, R., Zhang, S. and Xue, S.: A review of bolt tightening force measurement and loosening detection, *Sensors*, Vol.20, No.11, 3165, 2020.6.
- 12) Tao, W., Shaopeng, L., Junhua, S. and Yourong, L.: Health monitoring of bolted joints using the time reversal method and piezoelectric transducers, *Smart Materials and Structures*, Vol.25, No.2, 025010, 2016.1.
- Park, S., Yun, C. B. and Roh, Y.: Active sensing-based real-time nondestructive evaluations for steel bridge members, *KSCE J. Civ. Eng.*, Vol.10, pp.33-39, 2006.
- 14) Jhang, K. Y., Quan, H. H., Ha, J. and Kim, N. Y.: Estimation of clamping force in high-tension bolts through ultrasonic velocity measurement, *Ultrasonics*, Vol.44, pp.e1339-e1342, 2006.12.
- 15) Hosoya, N., Niikura, T., Hashimura, S., Kajiwara, I. and Giorgio-Serchi, F.: Axial force measurement of the bolt/nut assemblies based on the bending mode shape frequency of the protruding thread part using ultrasonic modal analysis, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, Vol.162, pp.1-10, 2020.10.
- 16) Akutsu, A., Bajracharya, S., Sasaki, E., Shimozato, T. and Tai, M.: Eddy current based evaluation of axial force of high-strength bolts, *IABSE Congress: Resilient Technologies for Sustainable Infrastructure*, pp.1-9, Christchurch, New Zealand, 2020.9.
- Argatov, I. and Sevostianov, I.: Health monitoring of bolted joints via electrical conductivity measurements, *Int. J. Eng. Sci.*, Vol.48, pp.874-887, 2010.
- 18) Ritdumrongkul, S., Abe, M., Fujino, Y. and Miyashita, T.: Quantitative health monitoring of bolted joints using a piezoceramic actuator-sensor, *Smart Materials and*

Structures, Vol.13, pp.20-29, 2004.

- 19) Daniel, M. P., Park, G. and Daniel, J. I.: Improving accessibility of the impedance-based structural health monitoring method, *J. Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.15, pp.129-139, 2004.2.
- 水口義久,名和輝好:超音波による締結状態下のボルト軸力測定,非破壊検査,54巻,7号,2005.7.
- 酒井智次,牧野孝之,鳥山晴彦:超音波を利用した ボルト軸力の測定,日本機械学会論文集,43巻, 366号,pp.723-729,1977.2.
- 22) Joshi, S. G. and Pathare, R. G.: Ultrasonic instrument for measuring bolt stress, *Ultrasonics*, Vol.22, pp.261-269, 1984.11.
- 23) 高橋一歴,福田誠,今野和彦:超音波を用いたボルト-ナットの締結状態の評価に関する一方法,計測自動制御学会東北支部第285回研究集会,資料番号285-9, pp.1-5, 2013.12.
- 24) 鋼構造委員会,高力ボルト摩擦接合継手の設計法に 関する調査検討小委員会:高力ボルト摩擦接合継手 の設計・施工・維持管理指針(案),鋼構造シリーズ 15,pp.71-72,2006.12.
- 25) Kong, Q., Zhu, J., Ho, S. C. M. and Song, G.: Tapping and listening: a new approach to bolt looseness monitoring, *Smart Materials and Structures*, Vol.27, No.7, 07LT02, 2018.6.
- 26) 全邦釘, 井後敦史: Random Forest によるコンクリート表面ひび割れの検出, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol.71, No.2, pp.I_1-I_8, 2015.
- 27) Wang, F. and Song, G.: Monitoring of multi-bolt connection looseness using a novel vibro-acoustic method, *Nonlinear Dynamics*, Vol.100, No.10, pp.243-254, 2020.2.
- 28) 全邦釘,井後敦史,南免羅裕治,黒木航法,大窪和 明:車載カメラにより撮影された舗装画像からのデ ィープラーニングによるひび割れ率評価,土木学会 論文集 E1(舗装工学), Vol.73, No.3, pp.I_97-I_105, 2017.
- 29) 三上市藏,田中成典,樋渡達也,山浦忠彰:鋼橋の 高カボルトの軸力推定システム,土木学会論文集, No.549/I-37, pp.77-90, 1996.10.
- 30) Tran, D. Q., Kim, J. W., Tola, K. D., Kim, W. and Park, S.: Artificial intelligence-based bolt loosening diagnosis using deep learning algorithms for laser ultrasonic wave propagation data, *Sensors*, Vol.20, No.18, 5329, 2020.9.
- 31) Cha, Y. J., Choi, W., Suh, G. and Mahmoudkhani, S.: Autonomous structural visual inspection using region-based deep learning for detecting multiple damage types, *Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng., Special Issue: Health Monitoring of Structures*, Vol.33, No.9, pp.731-747, 2018.9.
- 32) Cha, Y. J., Choi, W. and Büyüköztürk, O.: Deep learningbased crack damage detection using convolutional neural networks, *Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng.*, Vol.32, No.5, pp.361-378, 2017.5.
- 33) Huynh, T. C., Park, J. H., Jung, H. J. and Kim, J. T.: Quasiautonomous bolt-loosening detection method using visionbased deep learning and image processing, *Autom. Constr.*, Vol.105, 102844, 2019.9.
- 34) Zhang, Y., Sun, X., Loh, K. J., Su, W., Xue, Z. and Zhao,X.: Autonomous bolt loosening detection using deep

learning, Struct. Health Monit., Vol.19, No.1, pp.105-122, 2020.

- 35) 辻洸人,鈴木啓悟,平田楓:機械学習を援用したコンクリート内鉄筋の腐食判別の試み,第75回年次学術講演会,2020.
- 36) Cha, Y. J., You, K. and Choi, W.: Vision-based detection of loosened bolts using the Hough transform and support vector machines, *Autom. Constr.*, Vol.71, pp.181-188, 2016.11.
- 37) 辻欣輝, 広兼道幸, 麻野貴義, 小西日出幸: 高力ボ ルトの軸力診断のための振動波形データにおける特 徴量の検討, 土木学会論文集 F6(安全問題), Vol.72, No.2, pp.I_177-I_182, 2016.
- 38) 石原靖弘,小林剛,狩野正人,亀井正博,谷平勉: 経年による軸力低下とばらつきが高力ボルト摩擦接 合の終局耐力に及ぼす影響,土木学会論文集, No.763/VI-63, pp.33-42, 2004.6.
- Breiman, L.: Random forests, *Machine Learning*, Vol.45, No.1, pp.5-32, 2001.4.
- 40) Kiranyaz, S., Ince, T., Abdeljaber, O., Avci, O. and Gabbouj, M.: 1-D convolutional neural networks for signal processing applications, *ICASSP 2019 IEEE*, pp.8360-8364, 2019.
- 41) 広兼道幸,中田弘一,小西日出幸,鈴木直人:パタ ーン認識を用いた高力ボルトの軸力診断に関する研 究,土木学会論文集 F6(安全問題), Vol.69, No.2, pp.I_69-I_74, 2013.
- 42) Breiman, L.: Bagging predictors, *Machine Learning*, Vol.24, pp.123-140, 1996.
- Birring, A. S.: TOFD principle, limitations, calibration and inspection, *e-journal of Nondestructive Testing*, ISSN 1435-4934, 2020.6.
- 44) Gauthier, B., Painchaud-April, G., Duff, A. L. and Bélanger, P.: Towards an alternative to time of flight diffraction using instantaneous phase coherence imaging for characterization of crack-like defects, *Sensors*, Vol.21, No.3, 730, 2021.1.
- 45) 新田勇, 松崎良男, 阿部正信, 宮島敏郎: ボルト頭 部頂面の変形に基づいた軸力測定方法の基礎研究, 日本機械学会論文集(C編), Vol.73, No.733, pp.200-206, 2007.9.
- 46) 潘超、山口隆司、鈴木康夫:ひずみゲージを用いた 高カボルト軸力の測定法に関する検討、土木学会第 65 回年次学術講演会、I-477, pp.953-954, 2010.
- 47) 西村宣男,秋山寿行,亀井義典:高力ボルト摩擦接 合継手に関する最近の研究動向,土木学会論文集, No.675/I-55, pp.1-14, 2001.4.
- 48) 荒川敬弘, 福本伸太郎, 大庭勇輝: 丸棒などの曲率 が超音波探傷に及ぼす影響, IIC REVIEW, No.58, pp.42-47, 2017.10.
- 49) 章忠,池内宏樹,斎木典保,今村孝,石井秀明,戸田浩,三宅哲夫:寄生的離散ウェーブレット変換およびその異常信号検出への応用,日本機械学会論文集(C編), Vol.75, No.757, pp.163-170, 2009.9.
- 50) 角田貴也, 鈴木啓悟:寄生的離散ウェーブレット変 換を応用したコンクリート内在欠陥像の形状鮮明化, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.73, No.2(応用力 学論文集 Vol. 20), pp.I 691-I 698, 2018.
- 51) 角田貴也, 鈴木啓悟: コンクリート内在欠陥を対象

とする線形化逆散乱解析の再構成像高精度化,土木 学会論文集 A2(応用力学), Vol.75, No.1, pp.23-36, 2019.

- 52) 浅本晋吾, 岡崎百合子, 岡崎慎一郎, 全邦釘: コン クリートの収縮・クリープの実験データを活用した 機械学習による回帰分析, AI・データサイエンス論 文集, Vol.1, No.J1, pp.122-131, 2020.
- 53) Miguel-Hurtado, O., Guest, R., Stevenage, S. V., Neil, G.

J. and Black, S.: Comparing machine learning classifiers and linear/logistic regression to explore the relationship between hand dimensions and demographic characteristics, *PLOS ONE*, Vol.11, No.11, 2016.11.

> (Received August 20, 2021) (Accepted December 15, 2021)

ULTRASONIC HIGH-STRENGTH BOLT AXIAL FORCE EVALUATION BY MACHINE LEARNING-BASED TO WAVEFORM ANALYSIS

Kensho HIRAO, Keigo SUZUKI, Kastumi MORITA, Yuichi ITO, Kouichi TAKEYA and Eiichi SASAKI

Bolt axial force of high-strength bolted joints decreases due to deterioration. One of the conventional methods to evaluate the bolt axial force is ultrasonic testing. However, quantitative evaluation of the bolt axial force is controversial in terms of accuracy, and some problems remain for practical use. This study attempts the accurate evaluation of the bolt axial force by ultrasonic testing. The time zone analysis of the ultrasonic waves indicated that the waveform in the initial time zone includes bolt axial force information. The parasitic discrete wavelet transform (P-DWT) was applied to improve the evaluation accuracy. As a result of targeting bolts manufactured in the same lot, machine learning using linear regression evaluated the unknown bolt axial force within an error of 6% or less. Therefore, it was shown that the proposed method of this study corresponds to the existing bolt and can evaluate the bolt axial force with high accuracy.