

# 腐食劣化した高力ボルトの残存軸力計測法

設計工学講座 丸山 直人

## 1. はじめに

近年、我が国において、高度経済成長期に建設された多くの橋梁は、重度の腐食劣化が原因で大規模な補強や通行止めなどが多く報告されるようになり、鋼橋の老朽化は加速的に進行している。今後、このような橋梁の適切な点検を行い、維持管理していくことが必要となっている。

鋼橋の腐食部位の中でも、摩擦接合型高力ボルト継手部は、腐食劣化が著しく速く、その腐食劣化状況によっては橋の安全性が損なわれる危険性の高い部位といえる。また、高力ボルトは、ボルト・ナット部において角が多いため、塗装膜厚を確保しづらく、飛来塩分も付着しやすいため、局部的に腐食劣化が激しい。そのように腐食劣化した高力ボルトは軸力が低下し、継手耐力も低下する恐れがある。

既往の研究結果<sup>1)2)</sup>より、高力ボルト腐食減厚量と軸力低下メカニズムについて、健全ボルトを用いて、ボルト頭やナット部を機械切削で人工的に減厚させ、ボルト軸部のひずみ変化量から軸力低下を推定している。その実験結果から、腐食減厚量が50%になると軸力が大幅に低下しており、特に、ボルト頭よりナット部の減厚量が、軸力に対する影響が大きい結果となっている。しかし、既往研究は、人工腐食モデルであるため、実際に腐食劣化した高力ボルト継手の評価でないため正確な評価となっていない恐れがある。

現行の点検法である叩き点検法<sup>2)</sup>は、軸力を推定するまでに至っておらず、精度に個人差があることが知られている。叩き点検法はボルト打音時の振動と音の違いからボルトの異常を検知していることから、軸力と打音時の音の周波数に関係があることが推測できる。

そこで、本研究では、2009年7月に厳しい腐食環境の中、自然崩落した鋼橋(図1)の回収部材(図2)を用いて、実際に腐食劣化した摩擦接合型高力ボルト継手部を研究対象とし、ナットの腐食劣化度とボルト打音時の周波数特性に着目し、腐食劣化した高力ボルトの残存軸力を推定する方法の提案を目的とする。本研究プロジェクトのフローを図3に示す。step1はナット肉厚に着目し、腐食劣化度の分類を行う。step2はボルトを打音した時の軸力と周波数の相関分析を行い、軸力推定法を提案する。step3は引張試験ですべり耐力を求め、すべり耐力から軸力を算出

する。また、腐食劣化度と残存軸力の相関式を求め、腐食劣化した高力ボルトの残存軸算出法を提案する。なお、本研究の範囲は、研究プロジェクト step1 と step2 である。

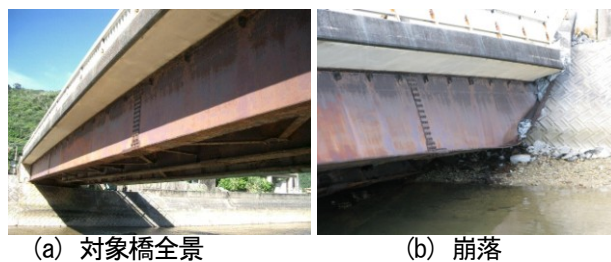


図1 研究対象橋梁

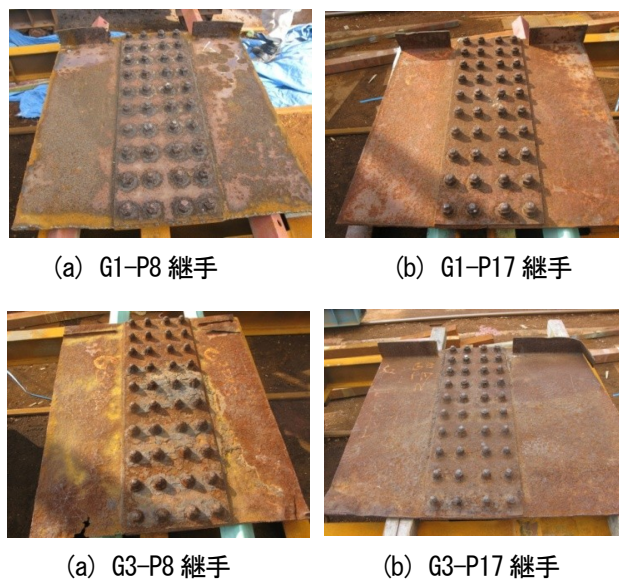


図2 研究対象の高力ボルト継手

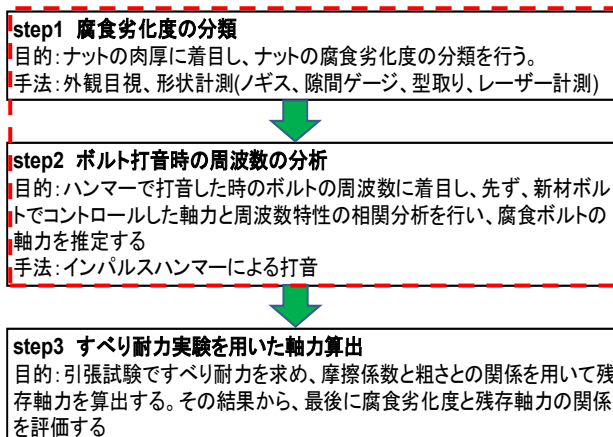


図3 研究プロジェクト

## 2. ナット部腐食劣化度の分類

ナット部の腐食減厚が、軸力への影響が大きいことから、ナット部の肉厚の減少量に着目し、外観目視と肉厚計測より、腐食形状度の分類を行った。

### 2.1 対象高力ボルト継手

研究対象の腐食高力ボルト継手は4体である。一体の添接板に高力ボルトが縦10本×横4本の40本あり、4体の総数160本の腐食した高力ボルトがある。

### 2.2 腐食劣化度の分類方法

#### (a) 外観目視

外観目視によって、ナット肉厚の減少量より分類した。外観上の分類として、ナット肉厚にあまり減少が見られなかったものを減肉量小、あきらかに肉厚に減少が見られるものを減肉量中、ナット上面の肉厚がほとんど残っておらず、山なりに細ったものを減肉量大と3グループに分類した。

#### (b) 肉厚計測

次に、ナット側面6面の上面肉厚をノギスで計測し、ナット側面の高さ方向の隙間をテーパゲージを用いて、ワッシャーからナット上面に向かって4mmピッチで計測した。計測状況を図4に示す。また、この時のノギスの計測値を $t$ 、ナット上面の隙間を $b_0$ 、高さ方向の隙間を $b_i$ として、高さ方向の肉厚 $W$ は以下の式から求められる。

$$W = t + b_0 - b_i \quad (1)$$

上記の(1)式を用いて、高さ方向の肉厚を算出し、ナット全体の平均肉厚を求める。そこで設計肉厚8.2mmより、ナット肉厚の平均減少量を求め、減肉量中のナット肉厚平均減少量25~50%を減肉量中-A、50~75%を減肉量中-Bと分けた。

### 2.3 腐食劣化度の分類結果

#### (a) 外観目視

外観目視によって分類した結果の例を図5に示す。総数160本の高力ボルトは減肉量小13本、減肉量中113本、減肉量大34本に分類した。

#### (b) 肉厚計測

外観目視による分類で、減肉量中が113本に対して、肉厚計測結果より、減肉量中113本は減肉量中-Aが97本、減肉量中-Bが16本と定量的に分類した。

以上の結果より、表1に本研究での分類結果として、腐食劣化度を減肉量小、減肉量中-A、減肉量中-B、減肉量大と4グループに分類した。

## 3. ボルト打音時の周波数の分析

現在行われている叩き点検法は、ボルト打音時の音や振動から軸力の大きさを判断している。この現象より、軸力の異なるボルトを打音した時の周波数と加速度に着目し、軸力との相関性について調べた。

### 3.1 実験方法

まず、新材ボルトを用いて軸力が既知のボルトを打音し、軸力と周波数のキャリブレーションを行った。

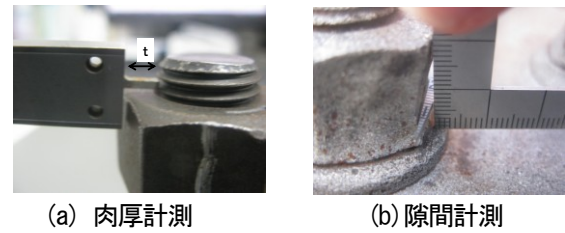


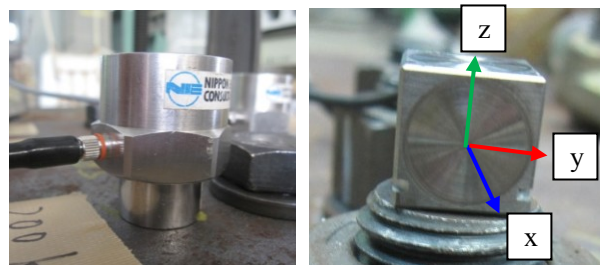
図4 計測状況



図5 外観目視による腐食劣化度分類例

表1 腐食分類結果

腐食分類	減肉量小	減肉量中-A	減肉量中-B	減肉量大
ボルト本数	13	97	16	34



(a) 縦の加速度計測 (b) 横の加速度計測

図6 加速度計



写真1 インパルスハンマ



(a) 縦方向の振動計測 (b) 横方向の振動計測

図7 加速度計設置状況

その結果を用いて、周波数と加速度の関係から軸力の推定法を提案する。実験では図 6-a に示す最大加速度  $50 \text{ m/s}^2$  周波数範囲 0.4-2000Hz の縦振動を計測する加速度計 SA13SC と、図 6-b に示す最大加速度  $\pm 400 \text{ m/s}^2$ 、周波数範囲 1~8000Hz の 3 軸方向(x、y、z 方向)の振動を計測する加速度計 SA12ZSC-TI の 2 つの加速度計を用いた。また、写真 1 に示す周波数範囲 1000Hz のインパルスハンマを用いて、打音時の加速度を計測した。

(a) ボルト軸方向振動計測

ボルト軸方向の加速度計を用いて、加速度計を軸部に設置し、軸力の異なるボルトのボルト頭を軸方向に 5 回打音した時に発生するボルト軸方向の周波数を計測する。

(b) ボルト軸直角方向振動計測

ボルト軸直角方向の加速度を用いて、加速度計をナット側面に設置し、軸力の異なるボルトのナット側面を、5 回打音した時に発生するボルトの軸直角方向の周波数を計測する。データ計測は、5 回打音を 1 セットとし計 3 セットデータを計測する。

3.2 新材ボルト実験結果

(a) ボルト軸方向振動計測結果

加速度計の設置位置を図 7-a に示し、0KN と 200KN 打音時の加速度と時間の関係を図 8、ボルト頭の打音した時の、軸力と周波数の関係を図 9 に示す。図 8 より、軸力が 200KN のボルトの方が軸力 0KN のボルトよりも振動しているのが伺える。図 9 より、0KN 時の周波数が軸力導入ボルトに比べ、低い値を示した。また、軸力導入ボルトは全て同程度の周波数が得られ、差は見られない。以上より、軸力導入の有無は、周波数と加速度の結果から推定できる。

(b) ボルト軸直角方向振動計測結果

加速度計の設置位置を図 7-b に示し、加速度計の y、z 方向がボルト軸直角方向になるように設置し、ナット側面を打音した時の、0KN と 200KN 打音時の加速度と時間の関係を図 10、軸力と周波数の関係を図 11 に示す。図 10 より、軸方向振動と同様に 200KN のボルトの方が軸力 0KN のボルトより振動しているのが伺える。図 11 より、150KN の周波数が 40Hz 程度であり、100KN 以上の周波数は 40Hz 以下であることから、40Hz 以下は軸力 200KN と推定する。また、y、z 方向について 0KN~100KN 間に相関があると伺えることから、y 方向と z 方向について指数近似式を求めた。y、z 方向の近似式を図 12 示す。図 12 より、y 方向が  $R^2=0.76$ 、z 方向が  $R^2=0.87$  であり、z 方向が相関が高かった。この結果より、このボルト軸直角方向振動計測方法から得られた周波数より、上式近似式を用いて腐食高力ボルトの残存軸力を推定する。

3.3 腐食高力ボルト打音と残存軸力の推定

計測する腐食ボルトは、腐食劣化度で分類した 4 グループから、減肉量小、減肉量中-B、減肉量大の 3 分

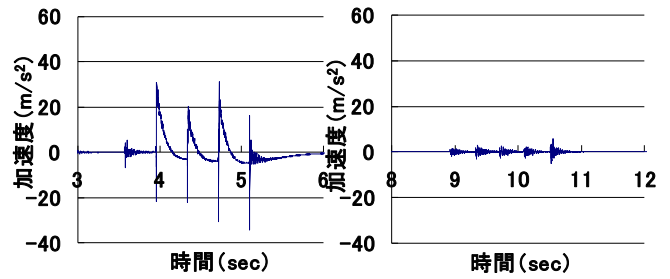


図 8 ボルト軸方向振動の加速度と時間の関係

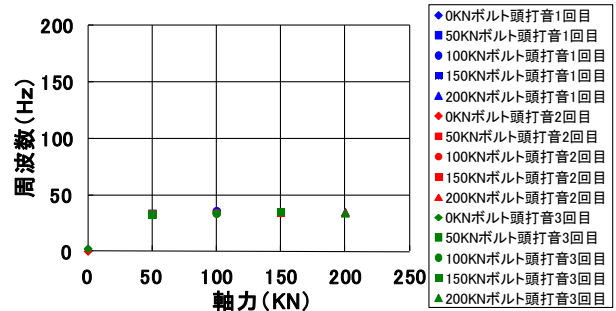


図 9 ボルト軸方向振動の軸力と周波数の関係

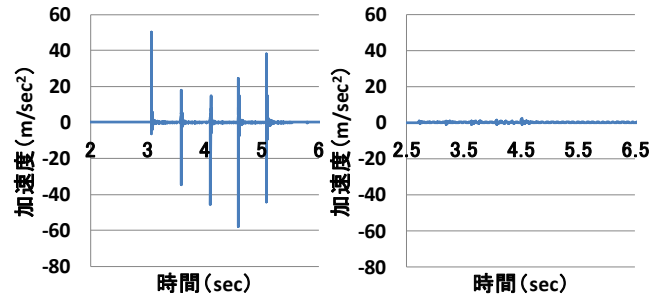


図 12 ボルト軸直角方向振動の加速度と時間の関係

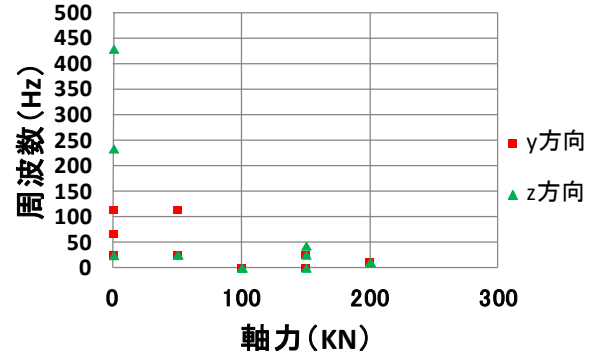


図 11 ボルト軸直角方向振動の軸力と周波数の関係

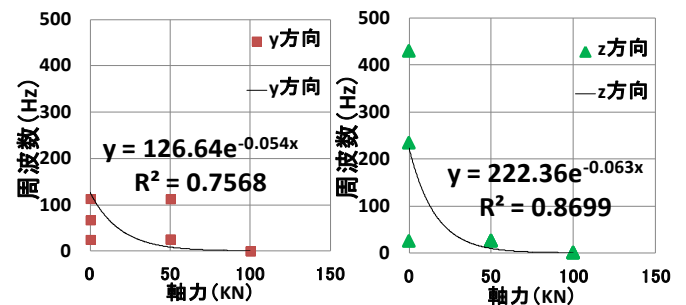


図 12 y、z 方向の近似曲線

類について計測を行った。各分類の加速度の1例を図14、15、16に示す。この結果より、減肉量小と中-Bの加速度の値は、ほとんど同じ程度であり、減肉量大はかなり小さい値であった。新材の結果と比べると50KN以上のボルトと同じ傾向であった。

各分類の周波数と推定した軸力の結果を表2に示す。減肉量小は計測ボルトの全数波数が40Hz以下だったので、軸力を推定すると200KNであった。減肉量中-Bは、得られた周波数が0.2~10Hzであり、40Hz以下なので、軸力を推定すると200KNと推定した。減肉量大は、得られた周波数4.4~58Hzより、40Hz以上のボルトが2本あり、軸力を推定すると25.25KN、25.27KNであった。残りの40Hz以下のボルトの軸力は200KNと推定した。

#### 4. まとめ

本研究では、腐食劣化した高力ボルトの残存軸力を推定する方法を提案することを目的に、腐食ボルトナット部の外観目視及び形状計測を行い、ナットの肉厚減少量から、腐食劣化度で分類した。その後、新材ボルトを用いてボルト打音時の周波数と軸力の相関分析を行った。その結果から、腐食劣化度の異なる腐食ボルトを打音した時の周波数から軸力を推定した。本研究より得られた結果を以下に示す。

- (1) 外観目視と肉厚計測の結果から、総数160本の腐食ボルトを4グループに分類し、減肉量小13本、減肉量中-A97本、減肉量中-B16本、減肉量大34本と分けられた。
- (2) 新材ボルトを用いて、キャレブレーションを行った結果から、横方向振動計測から得られる周波数から近似式を提案し、残存軸力を推定した。また、40Hz以下のボルトは200KNと推定した。
- (3) 腐食ボルトの推定軸力は、減肉量小全数200KN、減肉量中-B全数200KN、減肉量大25.25KN、25.27KNが1本ずつ、残りを200KNと推定した。

#### 参考文献

- 1) 名取暢, 西川和廣, 村越潤, 大野崇: 綱橋の腐食事例調査とその分析, 土木学会論文集 No.638/I-54, pp.299-311 2001.1.
- 2) 大野崇, 名取暢, 村越潤: 腐食減肉した高力ボルトの残存軸力測定, 土木学会年次学術講演会講演概要集第49巻, 第1号, 518-519頁, 1994.9.
- 3) 土木学会: 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, 丸善, pp.70-74
- 4) 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, pp.26-33, 1983.11
- 5) 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

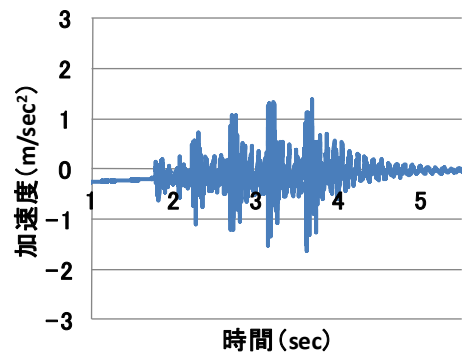


図14 減肉量小の加速度と時間の関係

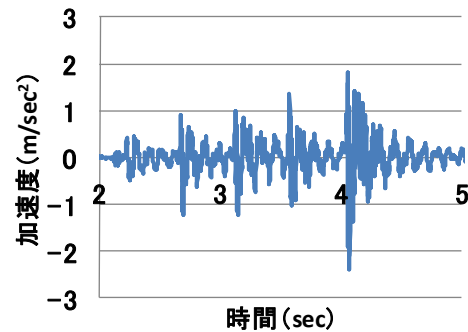


図15 減肉量中-Bの加速度と時間の関係

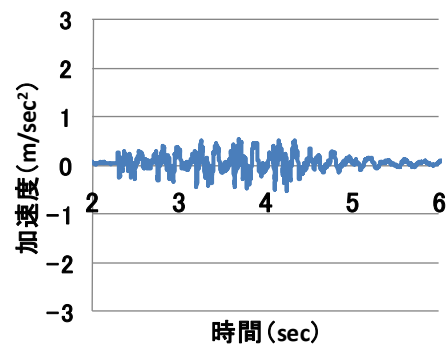


図16 減肉量大の加速度と時間の関係

表2 腐食ボルト推定軸力結果

	ボルト番号	G1-P17 1-a	G1-P17 2-a	G1-P17 3-a	G1-P17 4-a
減肉量小	周波数(Hz)	10.84	40.56	10.62	10.94
	推定軸力(KN)	48.38	30.17	48.67	48.25
	ボルト番号	G1-P8 7-a	G3-P17 5-b	G3-P17 5-c	G3-P17 5-d
減肉量中-B	周波数(Hz)	8.88	10.55	0.27	0.27
	推定軸力(KN)	51.13	48.75	99.37	99.38
	ボルト番号	G3-P17 9-a	G3-P17 9-b	G3-P17 10-a	G3-P17 10-c
減肉量大	周波数(Hz)	6.67	5.33	57.87	57.94
	推定軸力(KN)	55.08	58.18	25.27	25.25