

X線回折法を用いた高力ボルト残存軸力の非破壊的推定手法の検討

Non-destructive estimation method for clamping force of high-strength bolts

琉球大学工学部工学科 准教授 田井政行

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. 背景及び目的

近年、我が国の鋼橋では重度の腐食劣化が原因で大規模な補修・補強が報告されるなど、鋼橋の老朽化は急速に深刻化しており、腐食レベルに応じた適切かつ実用的な耐荷力性能評価の確立が急務となっている。鋼橋の摩擦接合継手の高力ボルトは、写真1に示すように腐食減肉が著しい部位の一つである。腐食減肉した高力ボルトは、軸力低下を引き起こすため、残存軸力評価は橋梁の安全性を確保するために重要である。



写真1 腐食高力ボルト

本研究では、高力ボルトの残存軸力評価法として、X線回折法による残留応力計測法に着目し、高力ボルト頭部応力と残存軸力の関係に基づく推定手法の検討を行った。検討にあたっては、まず、高力ボルト頭部応力と軸力の関係の関係を有限要素解析により検討を行った。そして、X線回折法により計測された高力ボルト頭部応力と軸力の関係を明らかにし、軸力評価法を提案するとともに、提案手法の推定精度の検証を行った。また、腐食高力ボルトへの適用を行うにあたり、ボルト頭部の減肉により頭部の応力状態が変化すると考えられるため、頭部減肉量と頭部ひずみの関係を解析的に検討を行い、腐食高力ボルトに対する評価手法の提案を行った。

2. 検討概要

2.1 高力ボルト頭部応力と軸力の関係の解析的検討

ボルト頭部応力と軸力の関係を有限要素解析により検討を行った。解析モデルを図1に示す。解析対象は、F10TM22の高力ボルトとし、母材、連結板、座金、ボルト部をソリッド要素によりモデル化している。なお、対称性を考慮して1/4モデルとし、各部材間にはペナルティ法による接触を設定している。材料構成則には、弾性係数は200GPa、ポアソン比は0.3とし、降伏応力は高力ボルト、座金は900MPa、その他は245MPaの完全弾塑性体を定義した。

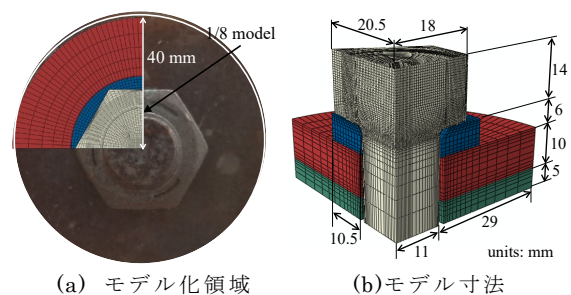


図1 解析モデル

境界条件は、図2に示すように、母材の対称面を鉛直方向に支持し、対称面には対称条件を与えた。ボルト軸力の導入は、設計軸力の10%割り増しである226kNに相当する595MPaをボルト軸部の対称面に与えた。

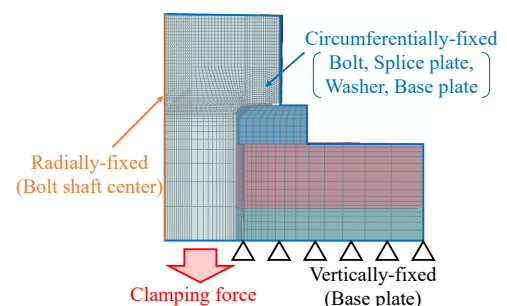


図2 境界条件

2. 2 X線回折法を用いた高力ボルト頭部応力計測による軸力推定法の提案と精度検証

高力ボルト頭部の応力と軸力の関係を用いた軸力推定法の提案を行う。ボルト頭部の応力計測には、写真2に示すポータブル型X線残留応力測定装置 μ -360n を用いた。回折に用いた特性X線は $\text{CuK}\alpha$ (波長 2.29093 \AA) で、X線のエネルギーは 10keV 以下である。計測に使用した入射角は約 45 度としている。



写真2 ポータブル型X線残留応力測定装置

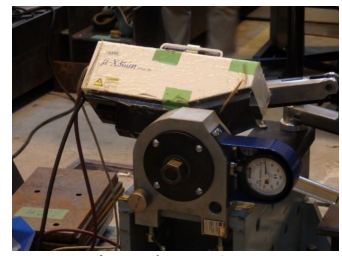


写真4 軸力計へのセット状況

写真3に示すように、高力六角ボルト頭部の黒皮を除去するために、深さ約 $70\text{--}100\mu\text{m}$ の電解研磨を実施している。そして、電解研磨後の高力ボルトを、写真4に示すように軸力計にセットし、軸力導入に伴うボルト頭部応力の変化について計測を行った。なお、試験体数は3体とした。



(a) 電解研磨状況 (b) 電解研磨後のボルト状況
写真3 電解研磨状況

次に提案手法の精度検証を行うために、摩擦接合継手試験体の高力ボルトの軸力計測を行った。試験体寸法を図3に示す。高力ボルトには、ボルト軸部に写真5のようにひずみゲージを設置し、事前に軸力計を用いて実施したボルト軸部のひずみと

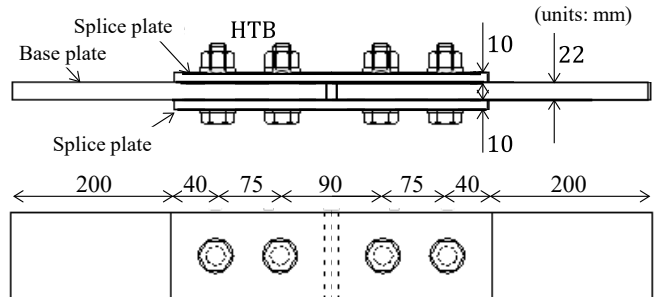


図3 継手試験体寸法

軸力の関係(図4)より、計測時の軸力が $110\text{--}226\text{kN}$ 程度にばらつくようにセットした。この試験体4体、すなわち高力ボルト16本を対象に軸力計測を行い、提案手法の精度検証を行った。

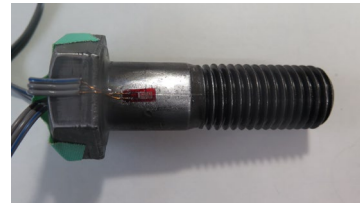


写真5 ボルト軸部へのゲージ設置状況

2. 3 腐食減肉が生じた高力ボルトへの適用の検討

提案手法を腐食減肉が生じた高力ボルトへ適用する場合、計測を行うボルト頭部が減肉している場合がある。ボルト頭部の減肉により頭部の応力状態が変化すると考えられるため、頭部減肉を考慮したボルト頭部応力と軸力の関係を明らかにする必要がある。そこでボルト頭部応力と軸力の関係を有限要素解析により検討を行った。解析モデルや境界条件は2.1と同様である。

解析パラメータは、図5に示すようにボルト頭部高さの減肉とボルト頭部側面の減肉である。減肉に伴う応力の再配分を考慮するために、解析中に要素を徐々に削除して解析を行っている。なお、側面の減肉については、モデルの簡素化のために、減肉後の形状が円柱上になるようにして解析を行った。

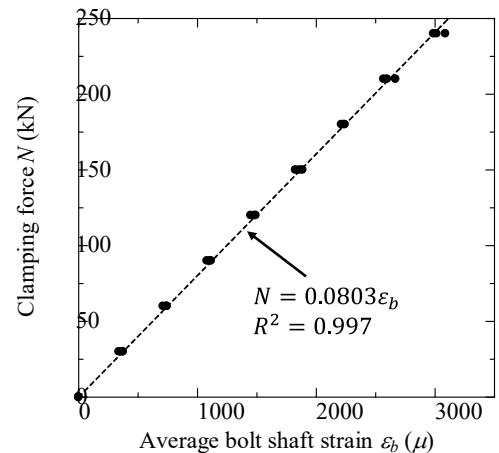


図4 ボルト軸力とボルト軸部ひずみの関係

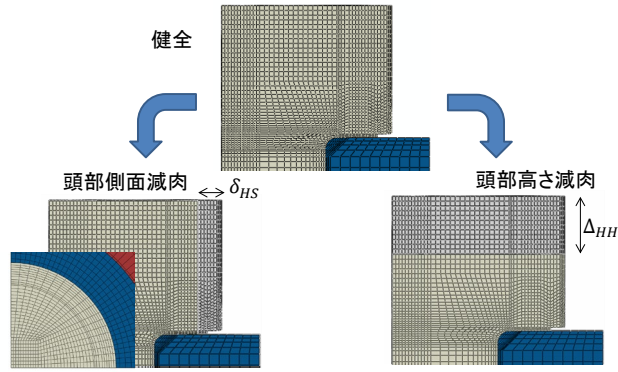


図 5 解析パラメータ

(実験調査によって得られた新しい知見)

3. 1 高力ボルト頭部応力と軸力の関係の解析的検討

解析より得られたボルト頭部近傍の最小主応力分布を図 6 に、ボルト頭部中心の応力と軸力の関係を図 7 にそれぞれ示す。図 6 に示すように、ボルト頭部中心は、軸力導入に伴い曲げ状態であり、表面では圧縮応力が生じている。このボルト中心部の圧縮応力と導入軸力の関係は比例関係にあり、解析結果の回帰直線より下式の関係があるといえる。

$$N = -0.5482\sigma_{bhFEM} \quad (1)$$

ここで N は高力ボルトの軸力 (kN)、 σ_{bhFEM} は解析より得られたボルト頭部中央の最小主応力 (MPa) である。

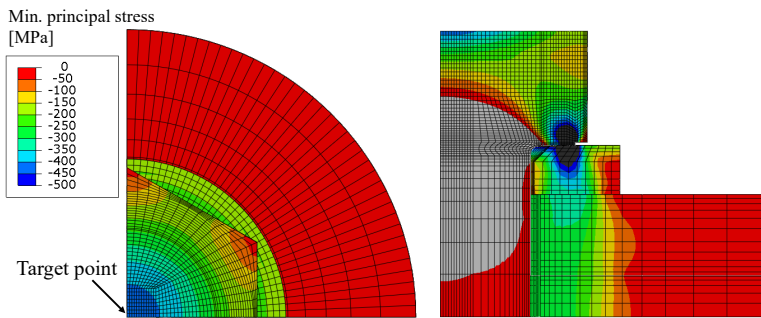


図 6 最小主応力分布

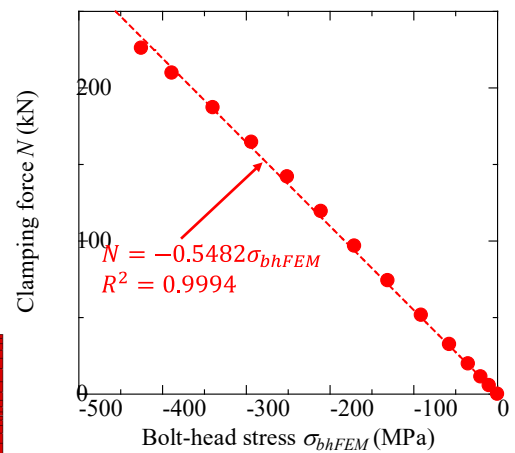


図 7 ボルト軸力と頭部中心応力の関係

3. 2 X線回折法を用いた高力ボルト頭部応力計測による軸力推定法の提案と精度検証

高力ボルトのボルト軸力と X 線回折法によるボルト頭部応力計測結果との関係を図 8 に示す。試験体毎に黒、赤、青に分けて計測結果とその回帰直線を示している。導入軸力がゼロの場合、高力ボルトの製造プロセス中に導入されたと考えられる残留応力が原因で、応力値が試験体毎に異なっているが、回帰直線の傾きはほぼ同程度であった。図中の紫色で示す直線はすべての計測結果の回帰直線を示しており、下式で表される。なお、式(2)の傾きは、解析より得られた式(1)と同程度であり、有限要素解析も妥当な結果を与えているといえる。この式(2)を用いて高力ボルトの残存軸力の推定を行うこととした。

$$N = -0.5203\sigma_{bhXRD} + 30.93 \quad (2)$$

ここで σ_{bhXRD} は X 線回折法で計測したボルト頭部中央の最小主応力 (MPa) である。

式(2)を用いた X 線回折法の

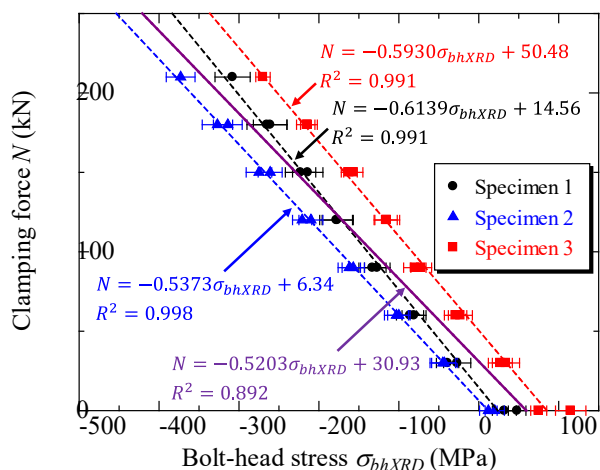


図 8 高力ボルトのボルト軸力と X 線回折法によるボルト頭部応力の関係

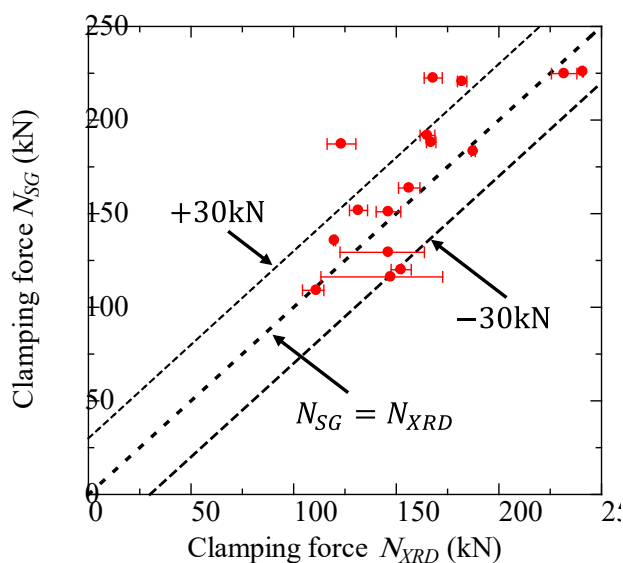


図 9 提案手法による軸力推定結果

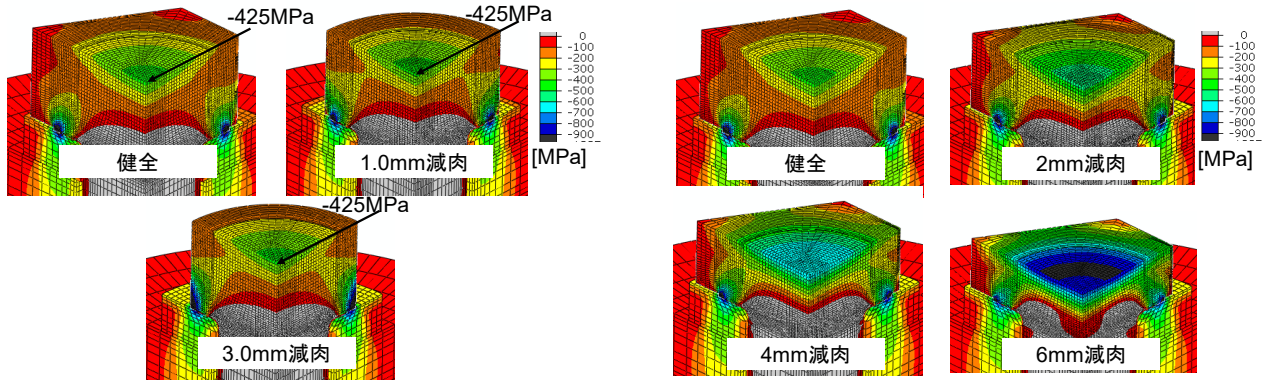
提案手法による軸力推定精度の検証結果を図 9 に示す。図中の縦軸はボルト軸部に貼り付けたひずみゲージより算出したボルト軸力 N_{SG} 、横軸は提案手法により推定した高力ボルト軸力 N_{XRD} を示している。図中の破線は、 $N_{SG} = N_{XRD}$ とその $\pm 30\text{kN}$ の範囲を示している。図より、ほとんどの結果が $\pm 30\text{kN}$ の範囲にプロットされており、提案手法による軸力推定精度は概ね $\pm 30\text{kN}$ であるといえる。ばらつきの要因としては、ボルト頭部応力の測定精度やボルトの製造過程で導入された残留応力のばらつきが原因であると考えられる。

3. 3 腐食減肉が生じた高力ボルトへの適用の検討

解析より得られたボルト頭部高さ減肉時及び側面減肉時の最小主応力分布を図 10 に、頭部最小主ひずみと軸力の関係を図 11 にそれぞれ示す。図に示すように、ボルト頭部側面の減肉量が増加したとしても、ボルト頭部の応力分布に大きな差異は見られず、3 mm 程度の幅方向の減肉量がボルト頭部応力に与える影響はほとんどないといえる。一方、ボルト頭部の高さ方向の減肉量では、減肉量が増大するに従い、ボルト頭部の最小主応力が増大する傾向が見られた。これは、ボルト側面の減肉量と比較してボルト頭部高さが減少した際の頭部の曲げ剛性の低下量が大きいためであると考えられる。それゆえ、ボルト頭部の高さ方向の減肉がボルト頭部の応力値に支配的であると推察される。

また、ボルト軸力と頭部ひずみの関係より、頭部高さ減肉量が 6mm 程度まではボルト軸力と頭部ひずみは線形関係にあるといえる。しかしながら、頭部高さ減肉量が 8mm となると、軸力 200kN 程度で非線形性を示しており、ボルト頭部応力を用いた軸力計測は、頭部高さ減肉量が 6mm 程度までが適用範囲といえる。

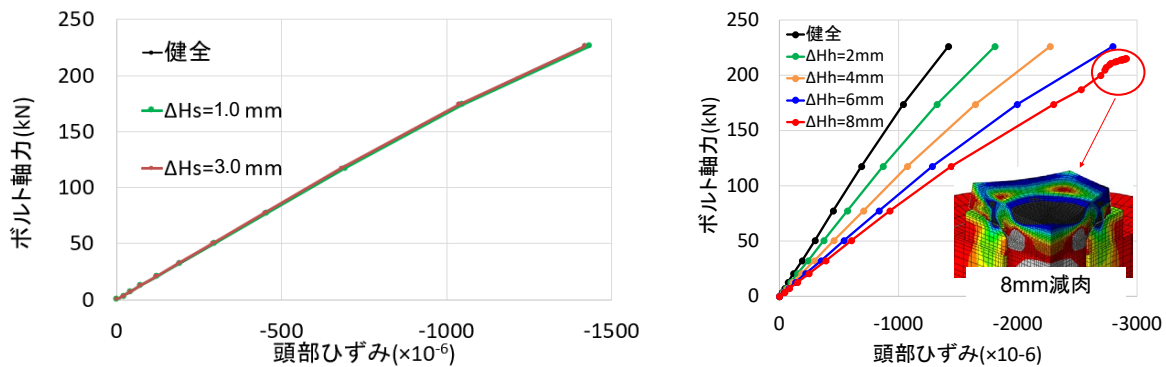
以上より、ボルト頭部中心の応力に対して、ボルト頭部側面減肉の影響は小さく、高さ減肉量の影響が支配的であるといえる。図 11(b) に示すように、頭部高さ減肉量の増大に伴い、ボルト軸力と頭部ひずみの関係の勾配は低下しており、頭部高さの変化量を計測することで、回帰直線の勾配を推定し、X 線回折法によりボルト頭部の応力計測を行うことで、腐食高力ボルトの残存軸力の絶対値を非破壊的に計測できると考えられる。解析より得られた各減肉量でのボルト軸力とボルト頭部ひずみの回帰直線の勾配 (表 1) より、健全時の頭部ひずみとボルト軸力の関係の回帰直線の勾配に対する減肉時の回帰直線の勾配の比を算出し、減肉量との関係を図 12 にプロットした。これより、回帰直線の勾配の比は減肉量に対して 2 次



(a) ボルト頭部側面減肉

(b) ボルト頭部高さ減肉

図 10 最小主応力分布



(a) ボルト頭部側面減肉

(b) ボルト頭部高さ減肉

図 11 ボルト軸力とボルト頭部中央位置の最小主ひずみの関係

表 1 回帰直線の勾配とボルト頭部高さ減肉量

頭部高さ 減肉量 (mm)	回帰直線 の勾配	健全(減肉量0mm)に 対する比
0	0.164	1.000
2	0.124	0.757
4	0.103	0.631
6	0.085	0.517

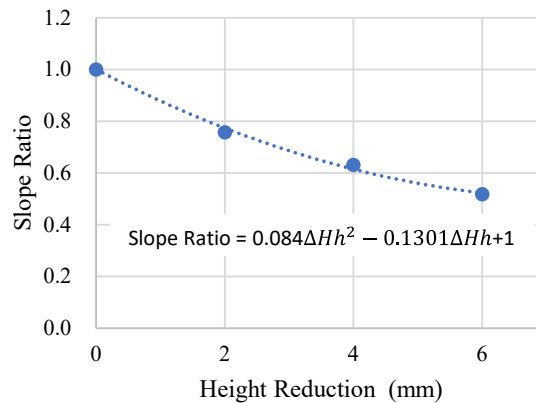


図 12 頭部高さ減肉量と回帰直線の勾配の変化率の関係

関数的に減少しており、図中の関係式を式(2)と組み合わせた式(3)より、減肉が生じた高力ボルトの残存軸力を X 線回折法により推定できると考えられる。

$$N = -0.5203(0.0084\Delta Hh^2 - 0.1301\Delta Hh + 1)\sigma_{bhXRD} + 30.93 \quad (3)$$

ここで、 ΔHh はボルト頭部高さ減肉量(mm)である。

今後は写真 6 に示すような、定電流電解により腐食減肉を再現した人工減肉高力ボルトを用いて、X線回折法によるボルト頭部応力と残存軸力の計測を行い、本手法の適用性について評価を行う予定である。

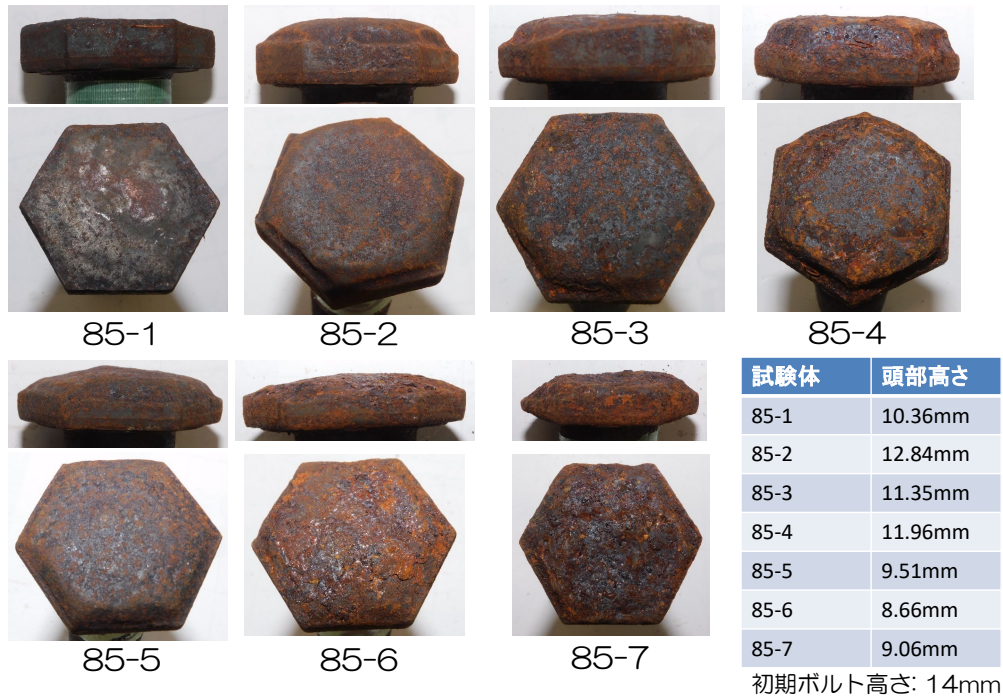


写真 6 定電流電解により作成した人工減肉高力ボルト

(発 表 論 文)

Masayuki Tai and Koji Kinoshita: X-Ray Diffraction Analysis of Clamping Force for High-Strength Bolts, Measurement, Vol.204, 112099, 2022.