

令和 2 年 7 月 15 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06532

研究課題名（和文）画像計測を用いた高力ボルト張力計測技術の開発に関する研究

研究課題名（英文）A study on the development for measuring system of bolt axial force using image measurement

研究代表者

鈴木 康夫（Suzuki, Yasuo）

富山大学・学術研究部都市デザイン学系・准教授

研究者番号：50431698

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、載荷実験とボルト形状を詳細にモデル化したFEM解析により、ボルト形状、ボルト軸心とボルト孔との位置関係が軸力-ひずみ関係に与える影響を検討し、ボルトの各部位のひずみに基づく軸力評価精度について明らかにした。
また、供用中の橋梁からボルトの抜取り調査を行い、供用後数十年が経過した橋梁では、残存軸力が設計軸力の30%未満のボルトも存在していることも確認した。
さらに、画像によるひずみ計測精度を検討し、光量が十分な理想環境下においては、500 μ 程度の実発生ひずみに対して10%程度の誤差で計測可能であること、光量、振動などの影響により、測定結果のばらつきが大きくなることなどを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、ボルト頭部に貼り付けたひずみゲージによるボルト軸力計測に関して、ボルトの個体差、ボルト孔とボルトとの位置関係が測定精度に与える影響について明らかにした点、また、画像による軸力評価について、現時点での画像計測技術による測定精度および今後解決すべき課題について明らかにした点で意義がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, loading tests and 3D-FEM analysis were conducted to discuss the effects of shape of bolt head and the position of the bolt on the relationship between bolt axial force and strain.

In addition, the bolts were inspected from the bridges in service for several decades. It was also confirmed that some bolts with a residual axial force of less than 30% of the design axial force exist.

Furthermore, the accuracy of strain measurement using images are examined and it is showed that in an ideal environment with sufficient light intensity, it is possible to measure with an error of about 10% for an actual strain of about 500 μ . On the other hand, it was clarified that the variation of the measurement result becomes large due to the influence of light quantity and vibration.

研究分野：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：高力ボルト 残存軸力 画像計測 非破壊検査

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

橋梁に代表される社会基盤構造物の老朽化が深刻化する中、既設構造物の維持管理の重要性が益々高まっており、適切な維持管理のための定期点検の重要性も高まっている。橋長 2m 以上の橋梁に対しては、国土交通省より発行された橋梁定期点検要領に基づき、5 年に 1 度の定期点検が義務付けられている。

橋梁定期点検要領では、近接点検が原則となっており、ボルトについては腐食損傷、ゆるみ・脱落・破断について点検を実施するように記載されている。ボルトのゆるみを点検する場合には、点検ハンマーを用いた打音点検あるいは軸力計を用いた軸力計測が標準的な点検方法として挙げられており、実際の橋梁点検業務においては、主に点検ハンマーを用いた打音点検が実施されている。しかしながら、点検ハンマーを用いた打音点検では、点検結果が点検者の熟練度に左右され定量的な点検記録が残されないこと、写真 1 に示すように非常に膨大な数の個々のボルトを点検するには非常に多くの時間を要することなどが課題である。一方、定量的な評価が可能と考えられる非破壊検査法として、図 1 に示すような超音波軸力計を用いた軸力測定法があるが、打音点検と同様に膨大な数のボルトを全数点検するには、非常に多くの時間を要することが課題として挙げられ、効率化が求められている。



写真 1 鋼箱桁の高力ボルト摩擦接合

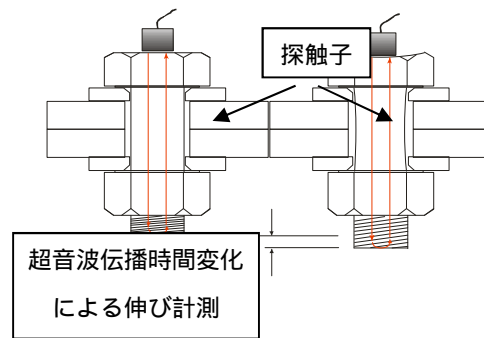


図 1 超音波軸力計による計測原理

ボルト軸力を定量的に測定する方法として、図 1 に示した超音波軸力計を用いた方法の他に、ひずみゲージを用いた測定方法がある。ひずみゲージを用いた軸力測定には、図 2 に示すように、ボルト軸部のひずみを計測する方法とボルトヘッドのひずみを計測する方法とがあり、特にボルトヘッドのひずみを計測する方法は他の計測方法と比べて簡便である。従来、ひずみを計測するには、電気抵抗式ひずみゲージを測定対象箇所へ貼付することが一般的であるが、測定対象箇所の変形量を精度良く測定できれば、ひずみゲージを利用せずひずみを計測することは可能である。一方、近年、デジタルカメラの高解像度化、パターンマッチング等を利用した画像認識・処理技術の向上に伴い、土木分野においても橋梁のたわみ計測などに画像計測技術が応用されている。これらの画像計測技術をボルトの微小な変形計測、すなわちボルト軸力計測に応用することができれば、鋼橋に多数存在する高力ボルト継手の健全性を定量的かつ効率的に評価することが可能になると考えられる。

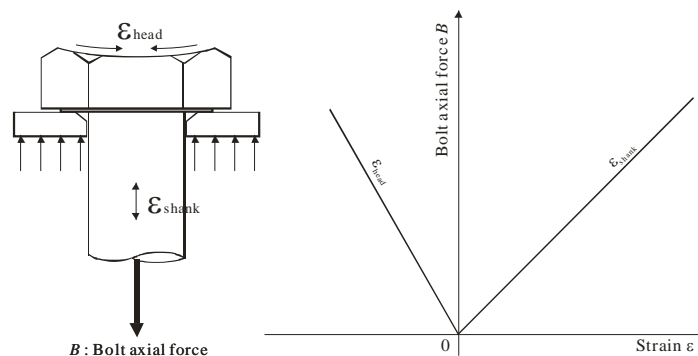


図 2 ボルトのひずみと軸力との関係

2. 研究の目的

本研究では、前章で述べた背景を踏まえ、鋼橋に多数存在する高力ボルト継手の健全性を定量的かつ効率的に評価するため、画像計測を用いたボルト軸力の張力測定システムを開発することを目指して、以下の点について検討することを目的としている。

(1) 既設橋梁における残存ボルト軸力調査

画像計測によりボルト軸力を評価する際の必要精度を確認することを目的として、既設橋梁からボルト抜き取り調査を行い、使用状況下におけるボルトの残存軸力調査を行う。

(2) ボルト頭部のひずみに基づくボルト軸力の評価精度

画像計測によりボルト軸力を評価する場合、接合部表面に露出しているボルト頭部またはナットの形状変化を撮影することが想定され、橋梁の部材連結部では、特にボルト頭部が露出していることが多いため、本研究では、ボルト頭部のひずみ変化に着目した。これまでも、ボルト頭部にひずみゲージを貼り付けてボルト軸力を評価された事例はあるが、ボルト頭部のひずみに基づくボルト軸力の測定精度について、詳細に検討された事例は多くない。

そこで、本研究では、画像により計測されたボルト頭部のひずみに基づき評価する際のボルト軸力の測定誤差を検討するのに先立って、載荷実験および3次元有限要素解析により、ボルト頭部の形状個体差、ボルトとボルト孔との位置関係がボルト頭部のひずみ発生状況に与える影響を詳細に検討する。

(3) 画像計測によるひずみ測定精度

本研究では、ボルト頭部表面をデジタルカメラにより撮影し、デジタル画像相関法を用いて任意の2点間距離を計測し、2点間距離の変位差から換算されるボルト頭部表面ひずみに基づいてボルト軸力を評価することを想定している。そこで、ボルト軸力に変化が生じた際のボルト頭部表面変形状況を把握するとともに、既存のデジタルカメラで撮影した画像から計測し得るひずみの測定精度について検討する。

3. 研究の方法

(1) 既設橋梁における残存ボルト軸力調査

供用後30年から50年経過した、橋梁形式やボルト等級が異なる供用中の4鋼橋における高力ボルトの残存ボルト軸力を調査する。

ここで測定対象とした4橋では、摩擦接合用高力六角ボルトを使用しており、ボルトにはF10TとF11Tが使用されている。また、対象橋梁は30年以上の前の設計であり、高力ボルトの接合面は塗装を施さない仕様であった。なお、架橋地点の海岸線までの距離はD橋を除き、10km以上内陸部に位置している。調査対象橋梁の概要を表1に示す。

表1 調査対象橋梁の概要

橋名	A橋	B橋	C橋	D橋
形式	鉸桁	鉸桁	鉸桁	箱桁
橋長	547m	333m	214m	719m
建設年 (供用年数)	1965年 (54年)	1988年 (31年)	1975年 (44年)	1987年 (32年)
ボルト等級	F11T	F10T	F11T	F10T
海岸線からの距離	40km	40km	28km	8km

ここでは、現場にてボルト頭部表面にロゼット型3軸ひずみゲージを貼付け、ボルトを抜き取ることにより残存ボルト軸力を評価した。残存ボルト軸力の測定手順は以下のとおりである。

既設高力ボルトのボルト頭部およびナット部の塗装を除去する。ひずみゲージの貼り付けに際し、ボルト頭部の刻印がひずみゲージと干渉するため、A~D橋の全てのボルト頭部の刻印のみをディスクサンダーで除去し、中心部に3軸ひずみゲージを貼りつける。なお、既設橋梁からのボルトの抜き取りに際し、実験室でのキャリブレーション試験時において既設橋梁で締結されていた状態を正確に再現するため、ボルト頭部と座金にはマーキングを行う(図3)。

ボルトを橋梁から抜き取ることで、ボルト軸力を開放し、ボルト軸力解放前・後の頭部のひずみ変化量を測定する。

ロードセルと油圧ジャッキを組み合わせた専用のキャリブレーション装置(図4)を用いて、対象のボルトが既設橋梁で締結されていた状態を再現し、荷重と頭部ひずみ変化量の相関関係をキャリブレーション試験する。この時、ボルトを橋梁から抜き取る際に計測したボルト頭部のひずみ変化量に相当する引張り荷重を既設橋梁で締結されていた時の残存ボルト軸力とする(図5)。

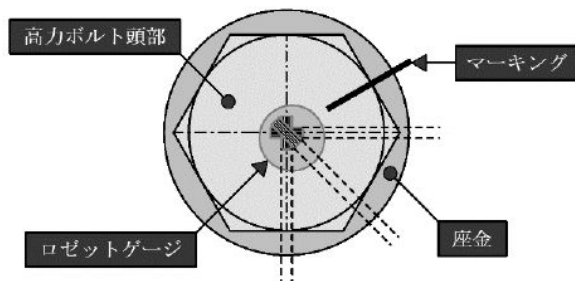


図3 ひずみゲージ貼付け状況

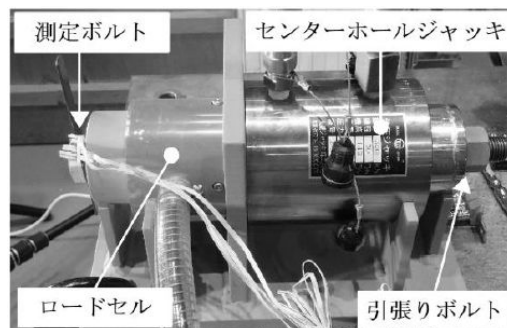


図4 キャリブレーション状況

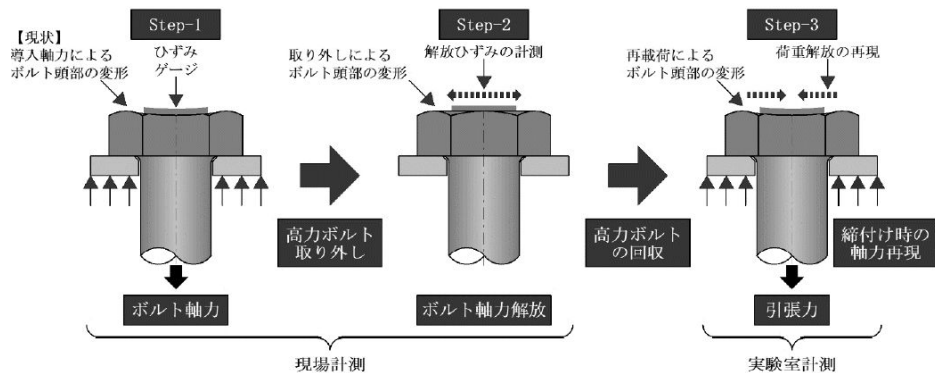


図 5 残存ボルト軸力測定手順

(2) ボルト頭部のひずみに基づくボルト軸力の評価精度

ボルト頭部の変形状況は、ボルト頭部高さ、ボルト頭部とボルト軸心とのずれなどのボルト製造時の製作誤差や、ボルトとワッシャー位置のずれにより影響される。そこで、図 6 に示すような 3 次元有限要素解析モデルを用いて、これらの製作誤差および位置ずれがボルト頭部のひずみ分布性状に与える影響について検討した。

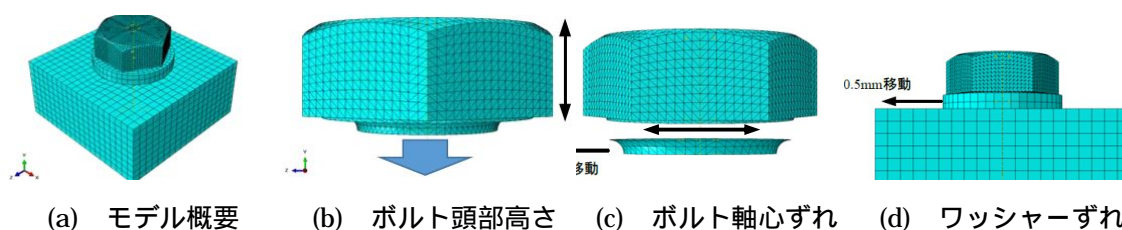


図 6 FEM 解析モデル概要と解析パラメータ

(3) 画像計測によるひずみ測定精度

前項に示した FEM 解析モデルで得られるボルト頭部の変位(ひずみ)発生状況を基に、既存のデジタルカメラによるひずみ測定精度について検討する。ここでは、2,400 万画素程度の静止画の画素ピッチとボルト頭部の変位とを比較し、画像分解能について考察するとともに、実橋での振動状況下における画像によるひずみ測定精度について検討することを目的として、図 7 に示すように、ハイスピードカメラ(解像度 378,880 画素, 撮影速度 10,000fps)を用いて、単純引張状況下におけるひずみ測定精度について確認した。

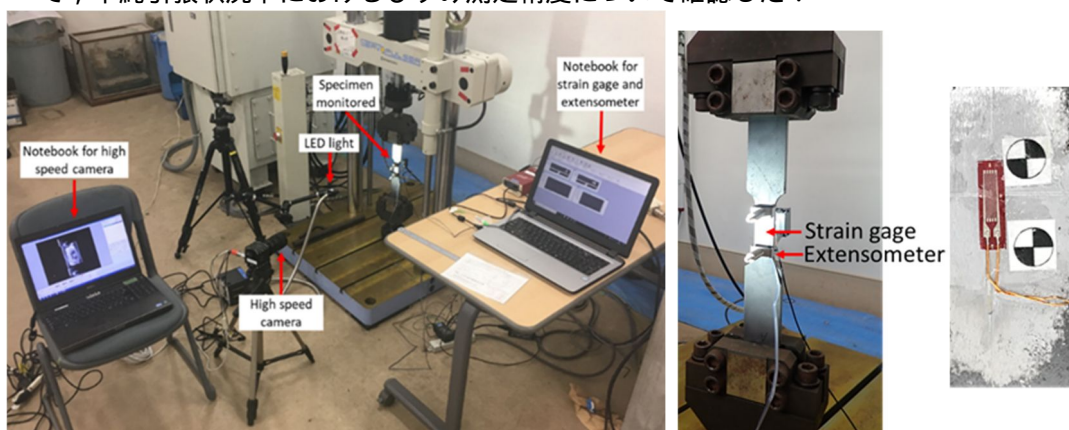


図 7 デジタルカメラによるひずみ計測状況

4. 研究成果

(1) 既設橋梁における残存ボルト軸力調査

既設橋梁の残存ボルト軸力調査結果の一例として、建設年代毎の残存ボルト軸力を図 8 に示す。図 8 よりわかるように、建設年による残存ボルト軸力の分布状況に明確な差異は認められないが、調査したほとんどのボルトにおいて、残存ボルト軸力は設計ボルト軸力から 10%以上低下していることがわかった。

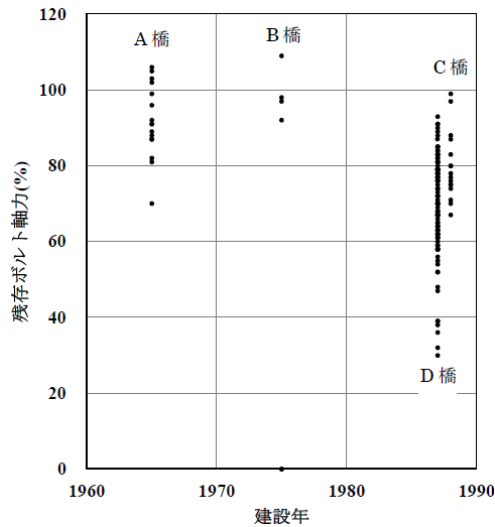


図 8 既存橋梁の残存ボルト軸力

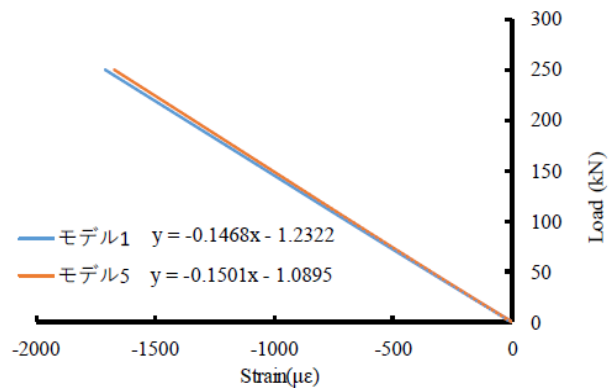


図 9 FEM 解析結果

(2) ボルト頭部のひずみに基づくボルト軸力の評価精度

解析結果の一例として、図 6(d)に示したワッシャー位置ずれ量を変化させた際のボルト軸力とボルト頭部ひずみとの関係を図 9 に示す。図中のモデル 1 はワッシャー中心とボルト中心が一致しているケースであり、モデル 5 はワッシャー中心がボルト中心から 0.5mm ずれたケースである。ワッシャーずれ量がボルト軸力とボルト頭部ひずみ関係に与える影響は小さく 2.2%程度の誤差であることがわかった。同様に、ボルト頭部高さ、ボルト軸心ずれがボルト軸力の測定精度に与える影響も小さく、ボルト頭部のひずみに基づいてボルト軸力を評価する場合、±4%程度の誤差で評価可能であることがわかった。

(3) 画像計測によるひずみ測定精度

デジタルカメラによるひずみ測定結果の一例として、高速カメラ（解像度 378,880 画素，撮影速度 10,000fps）によるひずみ測定結果とひずみゲージによるひずみ測定結果を図 10 に示す。また、図 6 に示した解析モデルによる解析結果の一例として、ボルト軸力が設計ボルト軸力から 10%～50%低下した場合の変位分布の変化を図 11 に示す。

図 10 より、高速カメラ（解像度 378,880 画素，撮影速度 10,000fps）を用いた場合、0.05mm 程度の変位であれば精度よく変位を計測できることがわかる。一方、図 11 に示すように、10%程度のボルト軸力変化をとらえるためには、0.001mm 程度の変位を計測する必要があり、37 万画素程度のカメラでは、軸力測定は困難であることもわかる。2400 万画素のデジタルカメラで変位を測定する場合、図 12 に示すように、1 画素あたりの画像分解能は 0.009mm 程度となり、10%程度のボルト軸力変化を評価するには、更に高解像度のカメラが必要であることもわかった。

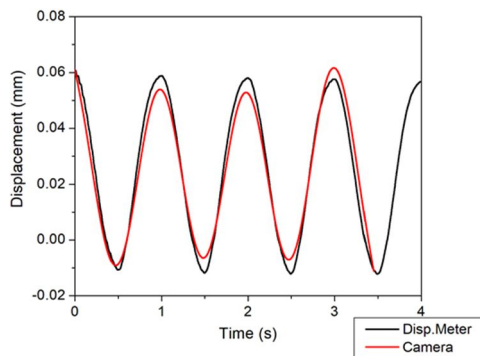


図 10 画像による変位測定結果

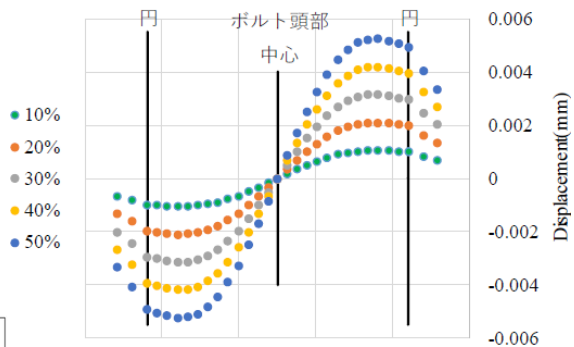


図 11 ボルト頭部の平面変位分布



図 12 ボルト頭部画像と画素数（2400 万画素）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Tomohiro Tsujita, Kunitomo Sugiura and Yasuo Suzuki
2. 発表標題 Study on Measurement of Axial Force of High Strength Bolt
3. 学会等名 The Thirty-First KKHTCNN Symposium on Civil Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 辻田智宏, 鈴木康夫, 杉浦邦征, 飯田哲也, 織田博孝
2. 発表標題 既設高力ボルトの軸力測定と測定のばらつきについて
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考