

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月26日現在

機関番号：52601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01301

研究課題名(和文) 老朽化社会インフラのための応力聴診器を用いた欠陥及びボルト締結緩み検出技術の研究

研究課題名(英文) Research on defect and bolt fastening looseness detection technology using stress stethoscope for aging social infrastructure

研究代表者

志村 穰 (Shimura, Jyo)

東京工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：70390424

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では応力聴診器を用いて、構造材料の欠陥およびボルト締結体の緩み検出を検討することが目的である。擬似欠陥として切欠きを有する平板試験片に繰返し荷重を負荷し、切欠き付近のひずみ分布を応力聴診器により測定することで欠陥検出を試みた。また、ボルト締結体の緩み検出として、打撃加振と応力聴診器を用いて動ひずみ測定を行い、ボルト軸力とひずみ時間変動との相関を調査した。前者のひずみ測定実験では、ひずみ分布における最大ひずみ発生点を見出すことで、欠陥検出の可能性を示唆した。動ひずみ測定実験では動ひずみ波形の減衰率の増減より、ボルト緩みの検出可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

応力聴診器を用いた構造部材の欠陥及びボルト締結の緩み検出技術は、低コストかつ簡易性を有する新たな非破壊検査手法として位置付けられ、主として国内の老朽化した橋梁構造物の保全・改修に役立てることができる。また、土木分野に限らず、機械及び建築分野でも本技術が適用可能であり将来性・発展性を期待できる。本研究成果はまだ実験室レベルのものであるが、様々な条件下での実験結果を蓄積し知見を深めることで、将来的には現場での使用が可能になると推察している。これにより、喫緊の問題である老朽化社会インフラの健全性を評価する技術として重宝されると考えている。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to examine the detection of defects in structural materials and looseness of bolted joints using a stress stethoscope. An attempt was made to detect defects by repeatedly applying a load to a flat plate specimen with a notch as an artificial defect and measuring the strain distribution near the notch with a stress stethoscope. In addition, dynamic strain measurement was performed using impact vibration and a stress stethoscope to detect looseness of bolted joints, and the correlation between bolt axial force and strain time fluctuation was investigated. The former strain measurement experiment suggested the possibility of defect detection by finding the maximum strain occurrence point in the strain distribution. In dynamic strain measurement experiments, it was shown that the bolt looseness could be detected from the increase or decrease of the damping factor of the dynamic strain waveform.

研究分野：材料力学

キーワード：材料欠陥 ボルト緩み 応力聴診器 打撃加振 ひずみ分布 動ひずみ 軸力 減衰率

1. 研究開始当初の背景

国内の橋梁等の社会インフラの多くは高度成長期に建てられ、2010年を境に建設から60年が経過し寿命を迎えようとしている。近年の急激な交通量増加および車両の重量化、塩害・アルカリ骨材反応等により、コンクリート部材のひび割れ、剥離・剥落、鋼部材の疲労によるき裂、腐食による損傷が顕在化している。近年の間を震撼させた事故として、2012年の笹子トンネル天井板落下事故が記憶に新しい。この事故ではボルトの緩みや欠落などの不具合が多数確認されており、構造部材の老朽化が直接的な原因と考えられている。このように経年劣化による各種構造物の破壊や破損事故が後を絶たず、国内の社会インフラの安全性や健全度は予断を許さない状況である。国や地方自治体の早急な対応が望まれるが、経済的負担が足枷となっている。このような背景から老朽化インフラの安全性や健全度を低コストで手軽に予測・評価できる非破壊検査技術が期待されている。

2. 研究の目的

上記の背景を受け、筆者らは市販の“応力聴診器”に着目し、これを用いた欠陥検出法を検討してきた。応力聴診器は非測定物に磁力を利用し押し当て、ひずみを測定するものであり、非破壊検査の一手法として位置付けられる。本研究では応力聴診器によるひずみ測定を進展させ“構造部材の欠陥”及び“ボルト締結の緩み”検出を試みた。なお、本稿では後者の応力聴診器用いたボルト締結体の緩み検出研究について報告する。

3. 研究の方法

3.1 ボルト締結体の緩み検出の概念「応力聴診器と打撃加振を併用した本提案手法」

本研究の目的は、簡便で定量的に扱うことのできるボルト締結体の緩み検出手法を確立することである。ボルトが緩むと被締結材との摩擦力、締結部近傍の剛性およびボルト各部に生じるひずみが増加すると考えられる。これらを踏まえ筆者らは、締付トルクの変化、すなわち、ボルト緩みによる軸力変動が動ひずみに影響を及ぼすと類推した。本研究では、Fig.1のように、任意軸力下にあるボルト締結体のボルトヘッドをハンマにより打撃加振し、発生する動ひずみを応力聴診器により検出し、軸力と動ひずみとの相関から緩みを判定する手法を試みる。本手法の確立により、打音検査の特殊性が除外され、限られた人的資源で簡便かつ定量的な運用が可能となる。

3.2 応力聴診器

応力聴診器とは、構造物にひずみゲージを押し当て、その箇所に生じているひずみを測定する機器である。本研究で使用する応力聴診器 FGMH-2A の外観を Fig.2 に示す。応力聴診器の本体一部はマグネットベースとなっており、その磁力により測定物に固定される。非接触型ひずみゲージを伴う受感部はばねの復元力で測定領域に押し付けられ、その際の摩擦によりひずみを測定する。従来のひずみゲージに比べ、接着剤不要で何度でも使用可能である。本研究ではゲージ長 3.0 [mm]、1 軸タイプ（東京測器研究所製、FGMH-2A）を使用した。

3.3 実験装置

トンネルや橋梁等の構造物には、添接板を用いた複数のボルトとナットによる締結が施されている。本研究では、このような実構造体を実験レベルに簡略するために、添接板を省略し、1組のボルト・ナットで1枚の平板に締結したものを対象とする。実験装置の外観を Fig.3 に示す。試験平板は縦 106[mm]、横 459[mm]、厚さ 9.5[mm]の熱間圧延鋼板 SPHC 材を使用し、はり構造力学試験装置（丸東三友製作所製、AMS-854）に固定する。打撃点の集中を図るため、打撃加振装置のハンマヘッドは球型とし、また、打撃加振装置の二度打ちを防止する工夫を施すと同時に、試験平板と隔離し力学状態に影響を及ぼさないようにするなど、実験装置の改良を適宜行った。

3.4 実験方法

(1) 締付トルク-ボルト軸力校正実験

本研究ではボルト締結にトルクレンチを用いるが、緩みの判定には、指標となるボルト軸力を把握する必要がある。そのため、ボルトゲージ（東京測器研究所製、BTM-6C）が埋め込まれた M16×40 の軸力測定用ボルトのひずみ測定を行い、締付トルクとボルト軸力との関係を明らかにする。ボルトゲージのひずみに対する軸力は付属の仕様書を参照することで得られ、最終的に締付トルクとボルト軸力との関係

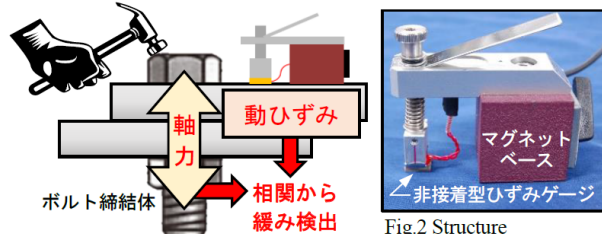


Fig.1 Concept of loose detection

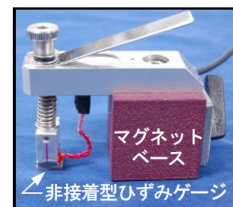


Fig.2 Structure of stress stethoscope

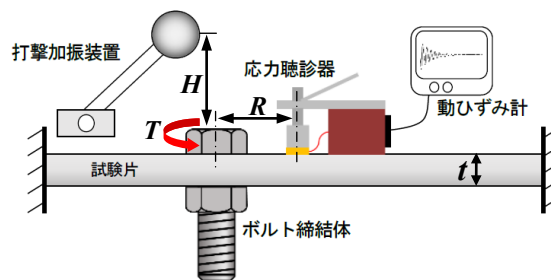


Fig.3 Schematic of experimental setup

Table 1 Each experimental condition

Variation of experiment	Tightening torque T [Nm]	Hammering height H [mm]	Distance from bolt head to stethoscope R [mm]	Distance from bolt head to hammering point S [mm]
① Effect of bolt axial force on damping ratio	40 - 100	150	40	0 (Bolt head)
② Relationship between damping ratio and hammering height	100	100, 150, 200	40	0 (Bolt head)
③ Relationship between damping ratio and distance R, S	100	150	25, 35, 45	0, 25, 35, 45
④ Relationship between damping ratio and specimen thickness	100	150	40	0 (Bolt head)

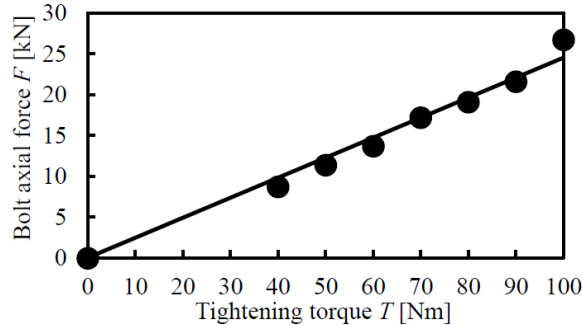


Fig.4 Relation between bolt axial force and tightening torque

を求めることができる。Fig.3 に示す実験装置の試験平板に軸力測定用ボルトを締結し、トルクレンチで締付トルク $T = 40$ から 100 [Nm]まで 10 [Nm]毎に負荷し、その際のひずみをデータロガー（東京測器研究所製、TDS-530）により測定、記録する。得られた結果より、締付トルクとボルト軸力との関係を定式化する。

(2) 動ひずみ測定実験

試験平板に M16×40 のボルト・ナットを締結し、応力聴診器を設置する。ひずみ測定には動ひずみ計（東京測器研究所製、DH-14A）を用いる。定量的な負荷を与えられるよう、整流器（カネテック製、KR-T101-6/24）および電磁ホルダ（カネテック製、KE-2B）などを用いた打撃加振装置を備え、電磁ホルダの励磁力の有無により、ハンマを自由落下で振り落とす構造としている。これらの装置を用いてボルトヘッドに打撃負荷し、この際のボルト周辺部に生じる動ひずみを応力聴診器により検出し、動ひずみ計を介してコンピュータに記録する。

本稿では実験条件を複数変化させた場合におけるひずみ波形の減衰比を比較する。各実験条件を Table 1 に示す。実験①は締付トルク $T = 0, 40$ から 100 [Nm]まで 10 [Nm]毎、7種類のひずみ測定を行う。実験②はハンマ振上げ高さを $H = 100, 150, 200$ [mm]の3種類で測定する。実験③ではボルトヘッドから応力聴診器までの距離 R とボルトヘッドから加振点までの距離 S をそれぞれ変化させた12種類の測定を実施する。実験④は被締結材の板厚を $t = 3.2, 5.6, 9.6$ [mm]とした場合の3種類の測定である。

4. 研究成果

4.1 締付トルクーボルト軸力校正実験結果

任意締付トルクに対する軸力測定用ボルトのひずみ出力と軸力測定用ボルトの校正表より、締付トルクとボルト軸力との関係を求めた。その結果を Fig.4 に示す。縦軸はボルト軸力 F [kN]、横軸は締付トルク T [Nm] である。締付トルクとボルト軸力との間には線形性があり、ボルト軸力の推定が可能であることが確認された。ボルト軸力換算式は式(1)の通りである。

$$F = 0.2451T \cdots (1)$$

4.2 動ひずみ測定実験結果

動ひずみ測定実験①の結果を Fig.5 に示す。縦軸はボルト締結位置を基準にした際の半径方向ひずみ ϵ_r [μ strain]、横軸は時間 t [msec] である。図中には 100 [Nm] のトルクを負荷した際のひずみ波形を示しているが、これは各 10 回の測定結果の算術平均で表している。いずれのトルクを負荷した場合も打撃加振時に圧縮側で最大ひずみを生じ、その後は減衰しながら零に収束する。また、ボルト軸力による波形周期の変化は見られないが、ボルト軸力の減少に伴い振幅の減衰が大きくなる傾向が見られる。

ここで、Fig.5 のひずみ波形が減衰特性を示すことから、減衰比として数値化し、ボルト軸力が減衰比に及ぼす影響を考察する。Fig.3 より算出したボルト軸力 F [kN] と減衰比ごとの関係を Fig.6 に示す。ボルト軸力の減少に伴い、減衰比が線形的に増加することが確認できる。これはボルトが緩み状態に近づくにつれてひずみ波形の減衰の度合いが高まることを意味しており、これを手掛かりとすることで、ボルトの緩み判定が可能になると考えられる。

次に、実験②の結果より算出したハンマ振上げ高さ H [mm] と減衰比ごとの関係を Fig.7 に示す。より高い位置からの自由落下による衝撃荷重の増大に伴い、減衰比が線形的に増加するこ

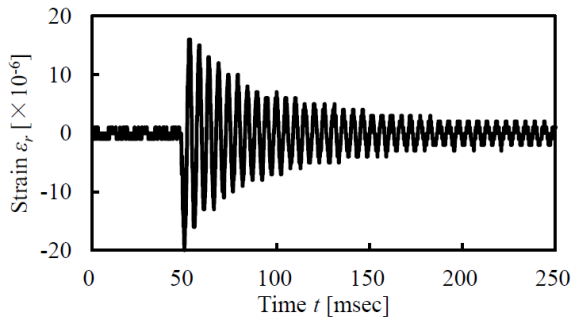


Fig.5 Dynamic strain for each torque

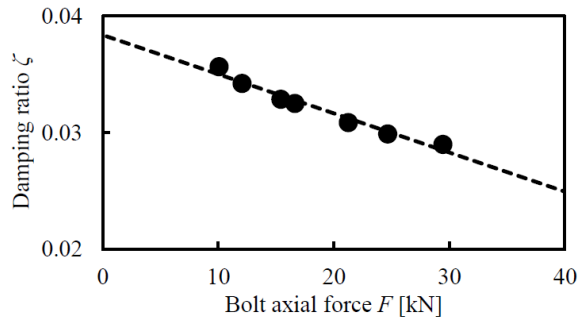


Fig.6 Effect of bolt axial force on damping ratio

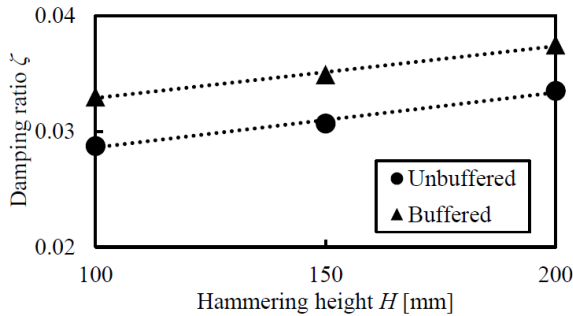


Fig.7 Relationship between damping ratio and hammering height H

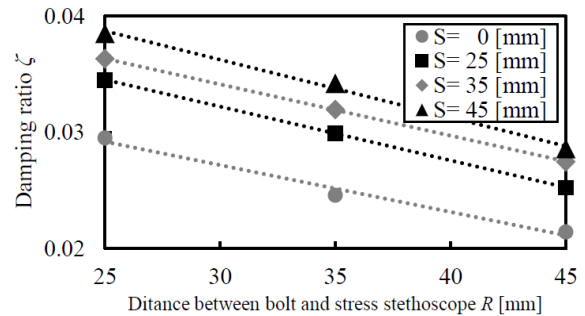


Fig.8 Relationship between damping ratio and distance R

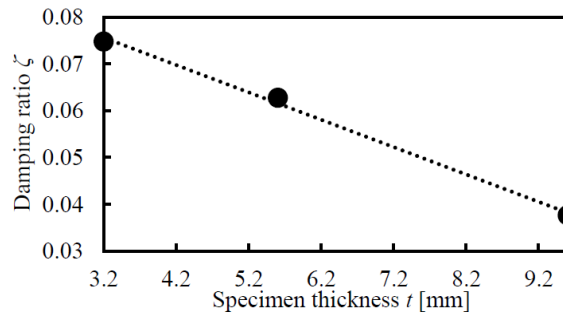


Fig.9 Relationship between damping ratio and specimen thickness t

とが確認できる。また、続いて、実験③の結果から得られた、ボルトヘッドから応力聴診器までの距離 R とボルトヘッドから加振点までの距離 S の2つの条件を変化させた時の減衰比との関係を Fig.8 に示す。ボルトヘッドと応力聴診器との距離 R の増大に伴い、減衰比は線形的に減少し、また、ボルトヘッドと応力聴診器との距離 S が大きくなると減衰比が増加することが確認できる。

Fig.9 は実験④の結果より、被締結材の板厚 t と減衰比 ζ との関係を整理したものである。板厚の増加につれ、減衰率が線形的に減少する傾向が見受けられる。

以上より、様々な実験条件において、それらの諸因子と動ひずみ波形の減衰比との間に線形性を有することが確認されたため、減衰比の線形回帰式を用いたボルト締結体の緩み判定の可能性が示唆された。

本研究の目的は簡便で一般性を有するボルト緩み検出手法の確立である。そのためにも、ボルト軸力と打撃加振で生じるボルト周辺部のひずみ変動との関係を調査し、動ひずみ波形の減衰比の観点からボルトの緩み検出の可能性を検討した。得られた知見を以下に記す。

- (1) 応力聴診器と打撃加振を併用したボルト締結体の緩み検出手法を提案した。
- (2) 実験条件の各諸因子が動ひずみ波形の減衰比に影響を及ぼすことが判明した。
- (3) ボルト軸力と動ひずみ波形の減衰比との関係より、ボルト締結体の緩み検出の可能性が示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 6 件)

- ① 志村 穰, 佐藤瑞樹, 林 文晴, 黒崎 茂, 応力聴診器と打撃加振を併用したボルト締結体緩み検出の基礎的検討, 日本機械学会関東支部 精密工学会共催 山梨講演会 2018, 2018 年 10 月 20 日, 山梨大学工学部 (山梨県甲府市)

- ② 佐藤瑞樹, 林 丈晴, 黒崎 茂, 志村 穰, 応力聴診器と打撃加振を併用したボルト締結体の緩み検出に関する基礎研究, 日本機械学会関東学生会第 57 回卒業研究発表講演会, 2018 年 3 月 16 日, 電気通信大学 (東京都調布市)
- ③ 佐藤瑞樹, 志村 穰, 応力聴診器を用いたボルト締結体の緩み検出技術の検討, 平成 29 年度社会実装教育フォーラム, 2018 年 3 月 2 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都渋谷区)
- ④ 柚木拓真, 志村 穰, 黒崎 茂, 林 丈晴, 応力聴診器と打撃加振を併用したボルト締結体の緩み検出の試み, 日本機械学会関東支部第 23 期総会・講演会, 2017 年 3 月 17 日, 東京理科大学葛飾キャンパス (東京都葛飾区)
- ⑤ 柚木拓真, 志村 穰, 応力聴診器と打撃加振を併用したボルト締結体の緩み検出の試み, 平成 28 年度社会実装教育フォーラム, 2017 年 3 月 3 日, 東京工業高等専門学校 (東京都八王子市)
- ⑥ イズル ハディ ロズラン, 志村 穰, 黒崎 茂, 林 丈晴, 応力聴診器を用いた欠陥検出技術の基礎的検討, 日本機械学会関東支部第 22 期総会・講演会, 2016 年 3 月 10 日, 東京工業大学大岡山キャンパス (東京都目黒区)

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：林 丈晴

ローマ字氏名：Takeharu HAYASHI

所属研究機関名：山梨大学

部局名：大学院総合研究部

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：70637264

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：黒崎 茂

ローマ字氏名：Shigeru KUROSAKI

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。