

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02222

研究課題名（和文）損傷に伴う応力再分配挙動を考慮した鋼構造物の状態把握システムの開発

研究課題名（英文）Development of condition evaluation system for steel structures considering redistribution of stress caused by damage progression

研究代表者

佐々木 栄一（Sasaki, Eiichi）

東京工業大学・環境・社会理工学院・教授

研究者番号：40311659

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,800,000円

研究成果の概要（和文）：近年、インフラ構造物の経年劣化・損傷が顕在化し、構造物の現有性能等の状態把握が重要となっている。本研究は、鋼構造物を対象として、損傷進行に伴う状態変化に着目した状態把握システムの構築を目指した検討を実施したものである。特に、腐食損傷等の損傷進行に伴う状態変化として、残存板厚に加えて、新たに残留応力および死荷重応力等の応力状態の変化に着目することを提案し、独自に考案した応力状態変化の非破壊的計測法により、構造物の現有性能等の状態把握、そのモニタリングを可能とするシステムの開発を目指したものである。本研究では、開発技術を応用した疲労損傷の影響の把握や、ボルト継手の状態把握にも試みている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、鋼構造物の維持管理において、状態把握が重要視されている中で、これまで注目されてきていない、損傷進行に伴う残留応力、死荷重応力の再分配等の応力状態変化の非破壊的検出、モニタリングのための手法を独自の応力測定手法により実現し、新しい鋼構造物の状態把握の仕組みを構築しようとする内容となっている。鋼構造物の主要な損傷となる腐食損傷による影響評価、疲労損傷による影響評価のいずれも検討対象としており、鋼構造物の維持管理に関する研究としては学術的に有益であると考えられる。また、現在問題となりつつあるボルト継手の状態把握、補修補強効果の検証などの社会的課題への展開性も示されていると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In recent years, deterioration and damage of structures have become critical issues, and it is important to grasp the actual state of existing structures. This study aimed to construct a new state evaluating method focusing on the state changes with the progress of damage for steel structures. In particular, as a state change due to damage progress such as corrosion damage, the change of stress state such as residual stress and dead load stress in addition to the residual plate thickness are evaluated by the constructed method using originally developed eddy current based non-destructive measurement system. In this study, application of the constructed method has been attempted to evaluate the effects of fatigue damage on stress state changes and the condition of bolted joints.

研究分野：鋼構造

キーワード：鋼構造物 損傷 状態把握 計測技術

1. 研究開始当初の背景

近年、インフラ構造物の経年劣化・損傷が顕在化し、構造物の現有能力等「状態(Condition)」の把握(以下、「状態把握」と記述する)が重要となっている。現状、定期的な目視点検による状態把握が基本となっており、その結果に基づいて、対応措置などの検討が進められている。一方で、目視点検による評価については、点検者によるばらつきなど、客観性に課題があるとされている。目視点検は、現在の維持管理の根幹をなす不可欠なものであるが、計測・モニタリングの援用により、より客観的な情報に基づく状態把握を実現できると考えられる。

鋼構造物においては、代表的な経年劣化・損傷として、腐食損傷が考えられる。腐食損傷の進行に伴い鋼板板厚が減少することで耐荷力が低下することから、板厚変化を捉えることが状態把握において重要であり、これまで提案されている腐食部材の耐荷力評価式も基本的に板厚減少率(現板厚/初期板厚)に基づいて表現されている。板厚減少率は、現板厚を最小板厚や平均板厚等として定義されるため、鋼板板厚を分布として得るべく多数点で計測を行うことが必要となる。また計測は、ケレンなどで表面さびの除去を行ったうえで行うため、通常大きな労力と時間を要する。申請者は、この課題に対するひとつのソリューションとして、さび除去を行わず鋼板の片側から計測し、さび厚および残存板厚を同時に分析できる低周波(100Hz程度)渦電流測定法を独自に開発し、腐食した鋼板の板厚等の情報が10%以下の精度で取得できることを示した。しかしながら、鋼板表面が腐食により複雑な凹凸状態になっている場合など精度向上が課題となる場合もあり、周波数を動的に変化させ複数の周波数情報を利用するなどで高度化を図る余地があると考えられる。

鋼構造物においては、腐食損傷による状態変化は、板厚変化にのみ起きているわけではなく、応力状態においても変化が生じていると考えられる。例えば、腐食損傷によりある領域の板厚が減少していく場合を想定すると、その領域での応力上昇が生じると予想されるが、板厚減少が進むうちそれまで分担していた応力が周りに分配され、特に完全に欠損すると残留応力や死荷重応力はほかの領域が全て負担することとなる。このような力学的な変化は、耐荷力に対しても影響を及ぼすと考えられるため、その影響や関係性が明らかになれば耐荷力変化を推察するモニタリングポイントや腐食損傷の深刻度評価などこれまでにない視点での状態把握が可能となる。しかしながら、このような応力変化は目視によっては捉えることができないうえ、これまでの計測方法では簡易にその変化を捉えることは容易ではないと考えられることから、新しい計測手法の提案が必要である。加えて、腐食損傷により欠損した部位に対しては、当て板やCFRP貼り付けなどの補修・補強対策が取られるが、残留応力及び死荷重応力等の再分配を考慮することにより、より効果的な補修・補強対策について考察できるものと考えられる。

損傷進行に伴う応力状態の変化は、腐食損傷の場合だけではなく、もうひとつの鋼構造物における代表的な損傷である疲労損傷、疲労亀裂が発生した場合にも生じる。その意味で、応力状態の変化に着目することは、鋼構造物の状態把握においては有効な考え方になり得る。疲労亀裂が発生した場合、亀裂面直交方向には応力を伝達できなくなることから、残留応力および死荷重応力が分担できなくなるうえ、車両通行等に伴う活荷重による応力変動も生じ得ない。したがって、このような応力分担、活荷重による応力変動の減少に着目することで塗膜や耐候性鋼材の場合の保護性さびにより視認が難しい疲労亀裂の発生検知、発生確認手法として利用できる可能性がある。

申請者は、磁歪効果に着目した応力計測方法(磁歪法)について実験的に検討していた際、応力による透磁率変化は渦電流コイルでの検出電圧にも影響があるのではないかと着想し、引張試験体を用いた基礎実験により、簡易な非破壊的応力計測に応用できる可能性を確認した。その際、通常の渦電流計測同様、周波数、リフトオフの影響を受けることが明らかとなった。磁歪法ではプローブを繰り返し回転させながら同一点を複数回計測する必要があるが、渦電流計測による方法は1回の計測での計測が可能と考えられ、より簡易な方法となると期待される。また同じ渦電流コイルで、低周波でさび厚(塗膜厚)及び残存板厚を分析し、高周波で応力を計測するといったことが周波数切り替えだけで可能となると考えられるため、点検ロボットへ搭載することで、これまで点検が困難であった部位の計測も可能となる可能性もある。しかしながら、磁歪効果を応用した渦電流応力計測は、方向による応力差(透磁率差)がある場合、すなわち、主応力方向が卓越しているような部位での適用となるため、その点に注意する必要があるほか、応力計測方法として構築するには、適した周波数やコイルなど検討すべき点が残されている。以上のように、鋼構造物においては、損傷進行に伴って目視点検により確認できない応力状態の変化が生じており、それを検知することが現有能力等の状態の把握、さらには効果的な補強対策の検討に重要であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、鋼構造物の維持管理において、これまで注目されてきていない、損傷進行に伴う残留応力、死荷重応力等の応力の再分配、応力状態変化挙動を踏まえた損傷の残存耐荷力等の現

有性能への影響の検討するため、応力状態変化の検出、モニタリング手法について独自に考案した渦電流を用いた応力測定手法の適用により検討するものである。加えて、周波数などのパラメータの影響を把握し、腐食部材の板厚等との同時分析を可能とする測定法の高度化も行うことを目的とする。また、腐食部材における検討のみならず、疲労亀裂の発生による応力の変化の検出についても検討を行い、鋼構造物の主要な損傷への対応の可能性について考察する。さらに、損傷を有する部材の補強に多く用いられる当て板のボルト添接による補強対策に対して、開発した応力状態変化の検出手法を応用し、ボルト締め付け状態の把握法についても検討を行う。

3. 研究の方法

本研究では、鋼構造物の維持管理上重要な現有性能等の状態把握を行うため、損傷進行に伴う応力等の状態変化特性の解明、状態変化による耐荷力への影響の検討、状態変化の検出方法に関する検討、実大実験による鋼橋梁部位への適用性の検証、点検時の簡易計測法としてのシステム構築、効果的な損傷補強対策に関する考察を実施した。具体的な検討内容をこれらのテーマから関連して以下に示す。

- (1) 腐食損傷進行に伴う応力再分配挙動およびその耐荷力への影響に関する数値シミュレーション(テーマ)
- (2) 渦電流を用いた鋼板の応力レベル評価法に関する検討(テーマ)
- (3) 実橋梁における計測法の検討(テーマ)
- (4) 渦電流を用いた鋼部材の状態把握システムの構築(テーマ)
- (5) 疲労損傷による応力状態変化に関する検討(テーマ , テーマ)
- (6) 点検時の簡易計測法としてのシステム構築(テーマ)
- (7) 効果的な損傷補強対策に関する考察(テーマ)

4. 研究成果

本研究で実施した検討内容について、それぞれ得られた成果を以下に述べる。

- (1) 腐食損傷進行に伴う応力再分配挙動および耐荷力への影響に関する数値シミュレーション(テーマ ,)

残留応力および死荷重応力作用下の鋼部材、特に腐食損傷が問題となる鋼桁端部における腐食進行に伴う、応力分担変化、応力再分配挙動について、FEM解析による数値シミュレーションにより、腐食損傷範囲、程度などをパラメータとして検討した結果、腐食損傷の進行による板厚減少に伴い、残留応力や死荷重応力等の分布が変化し、腐食損傷の進行が著しい場合は鋼板が降伏する可能性が確認された。一方で、負担が軽減される部位も存在することが明らかとなった。さらに、鋼桁端部の座屈実験結果を踏まえ、解析モデルの検証を行い、パラメトリック解析により応力分布の変化と耐荷力の変化について関係性を把握し、状態変化をモニタリングできる位置について考察を行った。

- (2) 渦電流を用いた鋼板の応力レベル評価法に関する検討(テーマ)

周波数、リフトオフ等の影響を確認するとともに、応力計測に適したコイル諸元について明らかにするため、動磁場数値シミュレーションによる検討し、応力変化検出に適した計測条件やコイルの形状および寸法について明らかにした。応力変化検出を行うためには、リフトオフに制限があることが明らかとなった。板厚計測のための計測条件と比べて、周波数が高いことから、複数の周波数を同時に励起する方法についても検討したが、周波数を切り替える方法の方にデータの取り扱いなどの面でメリットがあることが分かった。

- (3) 実橋梁における計測法の検討(テーマ)

腐食に伴う応力分布の変化を明らかにするため、実在する実大トラス橋梁を対象として、死荷重応力を作用させた状態での腐食損傷進行をシミュレートした解析を行い、床桁等における応力変動計測・モニタリングが腐食損傷の影響把握に有効である可能性が確認されたことから、実際に実トラス橋部材を対象として、応力状態把握のためのセンサ設置方法、計測(モニタリング)手法について検討した。具体的に床版撤去時の死荷重変化に伴う応力状態変化を対象としたため、実橋梁での計測を行い、その検討に活用した。

- (4) 渦電流を用いた鋼部材の状態把握システムの構築(テーマ)

鋼部材の腐食状態分析手法(さび厚、残存板厚同時分析)と応力計測方法を統合しより効率的な計測法とするため、同一計測点で同じコイルにより実施できるように、コイル諸元・コイル構造について検討し、システムの構築を図った。(2)の結果を踏まえて、周波数およびリフトオフさび厚、残存板厚同時分析プロセスにおける計測方法の高度化を図った。

- (5) 疲労損傷による応力状態変化に関する検討(テーマ , テーマ)

疲労損傷を有する鋼部材においては、亀裂部付近での残留応力、死荷重応力の低減等の応力変化が予想されることから、本研究で開発する応力変動検出法は、疲労亀裂の発生に対しても適用できると考えられたことから、溶接継手を対象として、シミュレーションにより応力変動状況について明らかにするとともに、溶接継手試験体に対する疲労試験を行って、予め亀裂発生位置付近に設置した渦電流センサによる計測実験を行い、亀裂進展に伴う応力分布の変動を捉えることができることを確認した。

- (6) 点検時の簡易計測法としてのシステム構築(テーマ)

実構造物の現場へ持ちこみ，腐食状態分析手法（さび厚，残存板厚同時分析）と応力計測方法を行えるよう，システムの構築を行って，実際に鋼桁端部モデルに対して，その適用を試みた．計測条件，計測方法について高度化を図ったものの，なおも腐食による表面粗度の影響を受け，リフトオフが生じるなどの課題があり，リフトオフを一定にするための工夫，ガイドの適用などについて考察した．

（ 7 ） 効果的な損傷補強対策に関する考察（テーマ ）

損傷に伴う応力状態が変化していることを考慮して，より効果的な損傷補強対策について検討し，FEM 解析によりその有効性について検証した．腐食損傷により応力分布が変動した後にボルト継手を適用した場合にも，腐食損傷前と同様の耐力まで耐力が回復する可能性も確認した．しかしながら実際の構造物への補強の際には，ボルトへの軸力導入が十分でないなどの場合も想定されたり，長期の補強効果の監視のため，ボルト締め付け具合の把握，特にボルト軸力の把握が，本研究で提案した応力計測法で実施できる可能性を解析的に確認し，実際に実験を行って，ボルト軸力レベルを把握することに応用できることを明らかにした．

以上，本研究では，渦電流を用いた独自の計測方法として，鋼構造物の損傷状態の把握，損傷の影響としての応力状態の変化を検出する手法を構築し，効果的な補強対策の検討，およびボルト継手の軸力評価などにも展開できることを示し，今後の鋼構造物の維持管理において有効な技術を提示したと考えている．

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1 . 発表者名 Ayako Akutsu, Sanjeema Bajracharya, Eiichi Sasaki, Tetsuhiro Shimozato, Masayuki Tai
2 . 発表標題 Eddy current based evaluation of axial force of high-strength bolts
3 . 学会等名 IABSE Congress (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Ayako Akutsu, Eiichi Sasaki, Tetsuhiro Shimozato, Masayuki Tai
2 . 発表標題 Advancement of Eddy Current Based Evaluation of Axial Force of High-Strength Bolts
3 . 学会等名 IABSE Congress (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Sanjeema BAJRACHARYA, Eiichi SASAKI
2 . 発表標題 Evaluation of Eddy Current Response due to the Applied Stress on a Steel Plate using Phase Diagram
3 . 学会等名 The 24th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation (ENDE2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Sanjeema BAJRACHARYA, Eiichi SASAKI
2 . 発表標題 Eddy Current based Stress Measurement of a Steel Plate using Phase Diagram
3 . 学会等名 12th Pacific Structural Steel Conference (国際学会)
4 . 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------