

氏名（本籍）	栗原 幸也（東京都）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	乙第 1191 号
学位授与の日付	2024 年 3 月 18 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目	送電鉄塔の異常検知を目的とした傾斜モニタリング手法の開発

論文審査委員	（主査）教授 佐伯 昌之
	教授 木村 吉郎 教授 塚本 良道
	教授 岡田 裕 教授 永野 正行

論文内容の要旨

日本全国に約 23.8 万基建設されている送電鉄塔は部材腐食、ボルト緩み、部材変形、疲労亀裂などの異常がしばしば確認されている。これらの異常は改修作業を早急に実施しないと、異常が進行して改修が困難となり、鉄塔の建て替えが必要となる可能性がある。上記の異常を引き起こす要因としては、鉄塔の基礎変位、送電線の異常振動、設計風速を上回る風速や鉄塔上の積雪（以下、冠雪）などの設計に考慮されていない物理現象が挙げられる。本研究では上記の要因の中でも、鉄塔の基礎変位と冠雪に着目し、傾斜変化から異常を検知するモニタリング手法の開発を行った。

開発したモニタリング手法は、鉄塔部材に設置した傾斜センサの観測データを、インターネット回線を介してサーバーに送信し、その傾斜情報から鉄塔の異常を検知する。使用する傾斜センサは低消費電力のもので、電池交換を行わず約 3 年間稼働できる設計とした。以下に本モニタリング手法を実際に適用する際の課題と、それへの対応を示す。

まず、鉄塔の基礎変位を傾斜モニタリングにより検知する問題への適用を検討した。鉄塔の基礎変位は鉄塔近傍で発生する地盤沈下や土砂崩壊の影響で進行する。基礎変位によって、基礎部分から鉄塔に 2 次応力が生じ、応力部材に許容応力以上の応力が発生し、部材変形などの異常がしばしば確認されている。また、鉄塔を巻き込むように土砂崩壊が発生し、鉄塔が倒壊した例も確認されている。そこで、この基礎変位を迅速に検知するために傾斜変化をモニタリングする。具体的には、鉄塔部材と土砂崩壊面近傍に打設した杭に傾斜センサを設置し、傾斜変化から基礎変位の進行を確認する。ただし、基礎変位の進行による部材損傷を未然に防ぐための、傾斜変化の閾値が定まっていない。本論文では、モニタリングに使用する鉄塔の閾値を実規模試験および

解析の結果から検討した。実規模試験では実規模鉄塔に強制基礎変位を与え、鉄塔部材の傾斜とひずみの変化を確認し、本実験結果を表現する解析モデルを作成した。作成した解析モデルの適用範囲を確認した後、様々な種類の鉄塔への閾値の汎用性を確認するため、25基の鉄塔解析モデルを作成して傾斜モニタリングで用いる閾値を算定した。

次に、冠雪による部材損傷を検知する問題への適用を検討した。冠雪は寒冷地域特有の現象ではあるが、鉄塔上の積雪によって2次応力が発生し、補助材が変形するなどの異常がしばしば確認されている。しかし、冬季は現地鉄塔への出向が困難なため、積雪によってどのように部材変形が発生するかは確認されておらず、対策工も行うことができていない。そこで、まずは冠雪が発生する送電鉄塔の部材に傾斜センサを設置し、部材撓みとねじりによる傾斜変化を2年間モニタリングした。その後、観測対象部材の解析モデルを作成し、観測した傾斜変化を表現する冠雪荷重を推定した。次に、モニタリングで解明した冠雪荷重を模擬した実規模試験を実施し、冠雪荷重により部材損傷が発生するメカニズムを解明した。更に、試験結果を再現する解析モデルを作成し、冠雪荷重の適切な対策工を提案した。

最後に、基礎変位および冠雪のモニタリングを実フィールドで実施し、観測された環境ノイズについて検討した。約2年間の観測データから使用している傾斜センサは最大で約0.02degの観測ノイズが発生することを確認した。観測データの検証および室内試験の結果から、この観測ノイズは温度との相関が高いことがわかった。そこで、温度によって変化する鋼材の熱膨張、電線張力変化、センサ自身のノイズの影響による傾斜変化を確認するとともに、温度との相関関係を用いた補正方法を算定した。

以上

論文審査の結果の要旨

学長からの審査付託を受けて、創域理工学研究科の社会基盤工学専攻3名、機械航空宇宙工学専攻1名、建築学専攻1名からなる上記の審査委員会を組織し、申請者より提出された学位論文および英文要旨に基づき審査を行った。

審査委員会では、学位申請者に学位論文の内容を説明させ、口頭試問を行った。さらに審査で指摘された事項に対する学位論文の修正点を説明させ、追加の口頭試問をおこなうことで、博士論文として満たすべき条件を確認した。

第1回審査では、学位論文を構成する全7章の内容を説明させ、その後、口頭試問を行った。第1章は、研究の背景と目的であり、送電鉄塔の維持管理における問題点の概要と、学位論文が解決しようとしている課題が説明された。第2章では、送電鉄塔に被害を与える要因や点検業務の現状が説明され、さらに、送電鉄塔以外の社会基盤構造物の点検業務に関する最近の研究動向についても説明された。これ等の説明から、申請論文の位置づけや、周辺分野に対する理解を確認した。第3章では、学位論文で使用した

傾斜モニタリングシステムについて説明された。傾斜センサーとして MEMS 加速度センサーを採用しており、間欠動作させることで、電力や通信の確保が難しい山間地域においても長期計測可能なシステムとなっている。第 4 章では、上記モニタリングシステムを送電鉄塔の基礎変位検知に適用する方法が説明された。現状、基礎変位の可能性が疑われる送電鉄塔では、年 1 回の測量により基礎変位を計測し、その値が許容値を超えていないかを確認している。山間地域における測量業務は危険で、高コストであり、かつ年 1 回しか進行状況を確認していない。この測量の代替策として、上記モニタリングシステムの活用が検討された。これを実現するには、基礎変位に対して傾斜変化の感度が高い位置にセンサーを配置し、さらに許容基礎変位量に相当する傾斜変化の閾値を定める必要がある。学位論文では、実規模鉄塔を用いて強制基礎変位試験を実施し、基礎変位と送電鉄塔の各部材の傾斜変化の関係を計測している。さらに、この実験を再現する有限要素モデルを構築し、基礎変位と傾斜変化の関係、および基礎変位と部材応力の関係を調べている。さらに、実規模鉄塔とは別に、多数の存在する送電鉄塔の数値モデルを構築し、これに基礎変位を与えることで、鉄塔のどの位置に傾斜センサーを設置すれば、どの程度の閾値で許容基礎変位を検知できるかを調べている。その際、上記モニタリング手法が適用できる送電鉄塔とそうでない送電鉄塔の特徴について述べている。第 5 章では、上記モニタリングシステムを冠雪の問題に適用している。近年になって、冠雪による鉄塔被害の報告件数が増えている。冠雪は豪雪地帯の山間部で発生することから、これまで原因が特定されず、対策工法も提案されていなかった。この問題を解決するために、実際に冠雪被害が発生した送電鉄塔に上記モニタリングシステムを設置し、2 度の冬期を含む長期モニタリングを行っている。そして、その観測データから、冠雪は偏心して発達することで部材に大きなねじり変形を与えること、これにより許容応力度程度の応力を発生させている可能性があることを確認している。また、冠雪による部材変形を抑えるためには、曲げ剛性を増加させるよりも、部材厚を増すことで捻じり剛性を確保した方がよいことを指摘し、具体的な対策工を提案している。第 6 章では、傾斜モニタリングシステムを実フィールドに展開した際に得られたデータを用いて、傾斜データに含まれる日周変動や季節変動を調べている。それによると、常時の変動は無視できない大きさであるものの、気温との相関が非常に高く、気温により補正することで、実務に耐えられる程度に変動を抑制することができることが説明された。第 7 章では、学位論文で得られた知見や、上記モニタリング手法の長所・短所などがまとめられており、その内容が説明された。以上の内容について、口頭試問を行った。

第 2 回審査では、第 1 回目の指摘に対する回答を再確認し、追加の口頭試問をおこなった。さらに、英文要旨の内容を説明させるとともに、2023 年度に学位申請者が国際学会で口頭発表を行ったことも確認した。これ等のことから、国際化に対応する研究者としての資質を有していることを確認した。

第 3 回審査では、公聴会を兼ねた審査会を実施した。参加者からの質問やコメントに

対する回答を確認することで、当該専門領域に対する十分な理解をもつことを確認した。

以上の審査により、本論文は送電鉄塔の維持管理において、実用可能なモニタリング手法を提案し、社会的課題を解決していることから、博士（工学）の学位論文として十分に価値あるものと認められる。