

	タカギ シュンイチ
氏名	高木 峻一
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博第1332号
学位授与の日付	2024年3月31日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	重ね補強した山形鋼トラス部材の座屈耐力評価に関する研究 (Buckling Strength Evaluation of Steel Angle Truss Member With Lap Reinforcement)
論文審査委員	主査 教授 佐藤 篤司 教授 井戸田 秀樹 教授 楠原 文雄 教授 薩川 恵一 (愛知工業大学)

論文内容の要旨

送電用鉄塔（以降、鉄塔）とは架空送電線を支持するための構造物であり、電気設備に関する技術基準を定める省令（以降、電技）に基づいて設計されている。近年、電力流通設備のレジリエンス強化に対する社会的要請を背景に、より実況に即した耐風設計手法が電技に反映された。鉄塔はその形状的特徴から主に風荷重によって耐力が決定され、風荷重で設計された鉄塔は相応の耐震性能を保有していることから、一般的には耐震設計は省略されてきたが、近年の震災経験を踏まえ、耐震性能の明確化や耐震設計の必要性などの気運の高まりを背景とした耐震基準の検討が進められている。このような耐風・耐震設計基準の改訂による設計荷重の増大に伴い、耐力評価結果に応じて既設鉄塔の改修が必要となる場合が確認されている。

鉄塔は、4本の主脚となる主材と構面を構成する斜材を基本としたトラス構造で構成されているのが一般的である。斜材の改修については部材取替え工法や補強方法が確立されているが、主材の取替えは特殊な施工工法を用いる必要があり、容易ではない。また、軸力主体の塔状トラス構造において、主材における所定の座屈耐力の確保は、構造信頼性上極めて重要である。

以上のことから、既設鉄塔の信頼性確保および経済的・構造的に合理的な鉄塔主材の補強工法の確立は重要な課題と位置づけられている。

山形鋼の補強工法について、既往研究では主に山形鋼個材を対象とし、理想的な補強状態で検討を行っているが、実鉄塔では重ね継手の存在や付属材・斜材等が主材に取付くことか

ら、より実態に即した補強工法の検討が必要である。また、補強効果の確認に留まっている研究も多く、乾式接合による補強を対象とした研究における補強効果の評価は、数例の研究に限られており、定量的な評価はあまり行われていない。

そこで本研究では、はじめに鉄塔山形鋼主材を対象とした補強工法の課題や補強効果の確認を目的とした座屈試験を実施し、継手偏心による耐力低下や補強による耐力上昇および傾向について検討した。次に、継手部材および補強材サイズが補強対象部材と同サイズと限定した場合の座屈耐力式を弾性理論解から構築した。その座屈耐力式に継手偏心による材端曲げモーメント比および補強材と既設材の断面性能比を組み合わせることで、異サイズ継手・異サイズ補強も対象とした座屈耐力式の拡張を試みた。最後に、重ね補強を模擬した弾塑性解析を実施し、その解析結果および座屈試験結果と、構築した座屈耐力式の比較検討を行うことで、座屈耐力式の有用性を確認した。本論文の内容は、全7章で構成されている。

第1章では、本研究の背景と目的および山形鋼部材の補強に関する既往研究について述べた。

第2章では、鉄塔における主材の取付き方やその構造的な特徴について述べた。その特徴から、本研究では乾式接合で部材を補強する工法に着目し、その補強工法の概要について述べた。

第3章では、本研究で対象とした補強工法における強度的な課題や補強効果の確認を目的とした座屈試験を実施した。その結果、補強効果については基準化細長比が非弾性座屈範囲の場合、無補強の座屈耐力は上回っていたものの、弾性座屈範囲の補強効果よりも小さくなること、非弾性座屈範囲と弾性座屈範囲では補強後座屈耐力の傾向が明らかに異なることを確認した。

第4章では、柱材に関する基本的な座屈耐力理論式の導出に際して、上下の継手部材および補強材が補強対象部材と同サイズであると仮定し、補強後の座屈耐力式の導出を試みた。偏心圧縮部材の座屈耐力に関して、座屈試験結果から得られた知見から全塑性状態を仮定し、secant式と組み合わせることで、座屈耐力式を構築した。次に、重ね補強の影響について仮想仕事の原理を用いて補強断面の曲げ剛性を検討した結果、弾性曲げ座屈が支配的な範囲において、補強時の曲げ剛性は剛性の足し合わせとして評価できることを確認した。

第5章では、補強対象部材と接合される上下部材の組み合わせを、一般的に用いられている設計標準から検討し、本研究の対象範囲を決定した。それをもとに、上下の継手偏心によって作用する偏心曲げモーメントの比に着目して座屈耐力式の拡張を試みた。また、補強部材の曲げ応力分担や曲げ剛性の増加を仮定することで、任意の補強部材サイズに対応した座屈耐力式を構築した。

第6章では、重ね補強を模擬した三次元モデルの有限要素法に基づく弾塑性解析を実施し、ここまで構築した座屈耐力式の有用性を確認した。座屈耐力式と弾塑性解析結果を比較すると、やや安全側評価ではあるものの、座屈耐力式と解析結果はよい対応を示しており、座屈耐力式の有用性が確認できた。一方、座屈試験結果は過小評価していたことから、座屈耐力式の運用上の扱い方についても言及した。

第7章では、本研究を通じて得られた結果を総括して示した。

論文審査結果の要旨

近年の震災経験を踏まえ、送電用鉄塔（以降、鉄塔）における耐震性能の明確化や耐震設計の必要性などの気運の高まり、耐震基準の検討が進められている。鉄塔は、4本の主脚となる主材と構面を構成する斜材を基本としたトラス構造で構成されているのが一般的である。斜材の改修については部材取替え工法や補強方法が確立されているが、主材の取替えは特殊な施工工法を用いる必要があり、容易ではない。また、軸力主体の塔状トラス構造において、主材における所定の座屈耐力の確保は、構造信頼性上極めて重要である。以上のことから、既設鉄塔の信頼性確保および経済的・構造的に合理的な鉄塔主材の補強工法の確立は重要な課題と位置づけられている。

本論文では、はじめに鉄塔山形鋼主材を対象とした補強工法の課題や補強効果の確認を目的とした座屈試験を実施し、継手偏心による耐力低下や補強による耐力上昇および傾向について検討している。次に、継手部材および補強材サイズが補強対象部材と同サイズと限定した場合の座屈耐力式を弾性理論解から構築している。その座屈耐力式に継手偏心による材端曲げモーメント比および補強材と既設材の断面性能比を組み合わせることで、異サイズ継手・異サイズ補強も対象とした座屈耐力式の拡張を試みている。最後に、重ね補強を模擬した弾塑性解析を実施し、構築した座屈耐力式と比較検討を行うことで、座屈耐力式の有用性を確認している。本論文は、全7章で構成されている。

第1章では、本研究の背景と目的および山形鋼部材の補強に関する既往研究について述べている。

第2章では、鉄塔における主材の取付き方やその構造的な特徴について述べている。その特徴から、本論文では乾式接合で部材を補強する工法に着目し、その補強工法の概要について述べている。

第3章では、本論文で対象とした補強工法の実部材座屈試験を実施し、非弾性座屈範囲と弾性座屈範囲では補強後座屈耐力の傾向が明らかに異なることを確認している。

第4章では、柱材に関する基本的な座屈耐力理論式の導出に際して、補強後の座屈耐力式の導出を試みている。偏心圧縮部材の座屈耐力に関して、座屈試験結果から得られた知見を用いて座屈耐力式を構築している。次に、重ね補強の影響について理論的展開を用いて補強断面の曲げ剛性を検討した結果から、弾性曲げ座屈時の補強効果は曲げ剛性の足し合わせとして評価できることを確認している。

第5章では、一般的に用いられている設計標準から検討し、偏心曲げモーメントの比に着目して座屈耐力式の拡張を試みている。また、補強部材の曲げ応力分担や曲げ剛性の増加を仮定することで、任意の補強部材サイズに対応した座屈耐力式を構築している。

第6章では、重ね補強を模擬した三次元モデルの有限要素法に基づく弾塑性解析を実施し、ここまで構築した座屈耐力式の有用性を確認している。結果として、やや安全側評価ではあるものの、座屈耐力式と解析結果はよい対応を示し、座屈耐力式の有用性が確認している。最後に、座屈耐力式の運用上の扱い方についても言及している。

第7章では、本論文の結果を総括して示している。

以上、示した結果より本論文は博士（工学）に適合するものと判断した。