

令和元年5月31日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06457

研究課題名(和文) 自然ハザード事象に対する送電施設の耐災害性評価と災害後の健全性判定基準の構築

研究課題名(英文) Assessment of disaster resistance of electric power facilities under natural hazards and establishing criterion for structural soundness determination

研究代表者

山川 優樹 (Yamakawa, Yuki)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80324010

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、自然ハザード事象における過大荷重作用下での送電鉄塔の損傷機構と耐荷力保持程度の解明を試みた。とくに地震や強風による被害を検討対象として、強風時の塔体作用風圧や電線張力増大を想定した外力作用下での送電鉄塔の損傷進展挙動を解析するとともに、地盤変状等に起因する基礎不同変位による耐荷力低下挙動を調べた。その結果に基づき、損傷程度と耐荷力保持程度との関連性について検討した。さらに、部材交換などの修繕を模擬したシミュレーション手法を構築し、この手法を用いて修繕による健全性回復程度の定量評価を行った。これにより、損傷形態に応じた効率的な修繕方法の策定が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、基礎不同変位や過大荷重の作用下での鉄塔の損傷機構と耐荷力保持程度の解明を試みた。また、損傷を受けた鉄塔の修繕シミュレーション手法を開発し、それを用いて修繕効果の定量評価を行った。この研究成果は、送電施設の耐災害性を向上させるとともに、保守管理・点検業務の技術水準の高度化を推進し、災害後の迅速復旧による電力供給の早期回復を実現するための基盤技術の確立に資するものである。また、損傷後の修繕要否を判断するための健全性判定指針および修繕後の回復性能を定量保証した修繕指針の策定を行うための基礎的知見として意義がある。

研究成果の概要(英文)：In this study, we performed a series of three-dimensional nonlinear elastoplastic finite element analyses to examine the failure behavior and the ultimate strength of a widely adopted transmission tower under excessive external loads due to natural hazards. Realistic external loads used in the standard design code, including tension forces of transmission cables and wind loads that vary with seasons were introduced as an equivalent nodal force in the finite element analysis. We also examined the degradation of tower strength under imposed support displacements due to ground deformation. Based on the analysis results, we clarified the relationship between the degrees of member damage and the residual strength after damage by quantifying the damage of members. In addition, we established a simulation technique to enable quantitative evaluation of the strength recovery of transmission towers after repair by replacing damaged members.

研究分野：土木工学，応用力学，計算地盤力学，弾塑性力学

キーワード：送電鉄塔 耐荷力 基礎の支持力 耐災害性 健全性判定 修繕シミュレーション

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災での福島第一原発事故の一因として、土砂崩壊による外部電源用鉄塔の倒壊が公式見解で挙げられた（引用文献①）。この他にも、2005年4月に北陸電力・志賀原発で地すべりに起因する鉄塔倒壊により原子炉停止が発生しているが、いずれも地盤変状や土砂崩壊に起因する鉄塔倒壊が事故の一因であることは注目すべき事実である。

東日本大震災での電力危機は、送電インフラの耐災害性向上と災害後の迅速復旧の重要性を再認識させた。送電設備に係る現行技術基準と保守管理体制に関する現況調査（引用文献②）によると、現状では保守不備に伴う事故は顕在化していないとしながらも、大規模地震災害や大型台風など過酷ハザード事象への備えとして、送電鉄塔の要求性能（特に耐震性能）の明確化や、災害時の電力早期復旧に係る技術水準の向上が必要とされている。

鉄塔に対する外的作用としては図1に示すものが考えられるが、鉄塔は軽量の骨組構造であるため、地震動そのものよりも強風の直接作用荷重や電線振動張力に起因する部材座屈等の損傷が支配的である。一方、基礎では地盤物性の不確実性を前提に十分な耐力を確保する設計がなされており、設計・施工が適切であれば想定荷重で損傷・破壊に至るケースは少ない。しかし上述のように地盤変状による鉄塔の倒壊や損傷（図2）が多数発生している事実を鑑みると、送電設備の耐災害性向上に向けて構造工学・地盤工学分野で取り組むべき以下3つの重要課題が挙げられる。

- ・大規模地震や大型台風など過酷ハザード事象による想定超過荷重作用下における鉄塔・基礎の耐荷性能の定量評価法の構築および損傷・崩壊機構の解明
- ・損傷後の修繕の要否や具体的な修繕方法を合理的に判断するための健全性判定指針の確立
- ・損傷後の修繕（部材交換など）による性能回復程度の定量的評価に基づく、修繕効果を定量保証した修繕方法決定指針の確立

一方、地震や強風等による損傷後の対応について考えると、目視点検と定性的な判断目安に基づく損傷度判定が行われることが多いのが現状である。また、修繕方法（継続使用／部材取替／リプレースなど）の判断も定量的・客観的基準ではなく経験ベースのことが多く、修繕による性能回復を定量保証した形には必ずしもなっていない。こうした現状を踏まえると、上記3つの重要課題に取り組むことにより、送電施設の耐災害性を向上させるとともに、保守管理・点検業務の技術水準の高度化を推進し、災害後の迅速復旧による電力供給の早期回復を実現するための基盤技術を確立することが喫緊の課題である。

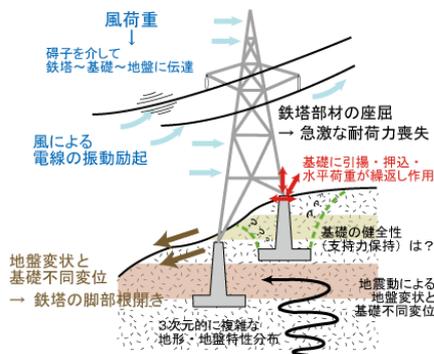


図1 鉄塔に対する外的作用



図2 地盤変状に起因する鉄塔の損傷事例

2. 研究の目的

送電鉄塔は電力インフラの基盤施設であり、高い信頼性と耐災害性が求められる。図1に示すように送電設備には多様な外的作用が想定されるが、想定荷重に対しては現行設計法で十分な耐荷力が確保されている。しかし、過大な風荷重や地盤変状に起因する基礎不同変位などによる鉄塔の損傷機構は未解明な点が多い。また、損傷後の耐荷力保持程度は明らかになっておらず、健全性判定の基準も未確立である。

こうした現状を踏まえて、本研究では送電設備の安全性と耐災害性の向上に貢献することを趣旨として、過大荷重や基礎不同変位が作用したときの鉄塔の損傷機構と耐荷力保持程度を解明することをひとつ目の目的とする。さらに、損傷後の修繕要否を判断に供する健全性判定指針および修繕後の回復性能を定量保証した修繕指針を策定するための基礎的知見の整備、ならびにそれに必要な解析手法の構築をふたつ目の目的とする。

3. 研究の方法

(1) 解析対象鉄塔と想定ハザード事象の設定

本研究では交流 66 kV 線路で採用されている標準鉄塔の一種を解析対象として、部材諸元等

を忠実に再現した有限要素解析モデルを構築した (図 3)。

次に、近年発生した送電施設の被害事例の収集と被害要因・形態の分析を行い、鉄塔の損傷・崩壊機構解明のための解析で想定するハザード事象を設定した (図 4)。本研究では地震や台風による被害を想定した検討に重点を置いた。

強風時の塔体作用風圧や電線張力増大を想定した外力として、塔体設計で一般に用いられる塔体自重・電線張力・風圧荷重・着氷着雪荷重の設定をベースとし、季節による外力特性の違いを考慮した 3 種類の想定荷重条件 (高温季(H), 低温季(L), 湿型着雪時(S)) を設定した。各想定季節荷重について、荷重の発生因子により定荷重 F_D と変動荷重 F_L に分け、定荷重とともに変動荷重に対する倍率係数 k (変動荷重係数) を漸増させて荷重 $F = F_D + kF_L$ を載荷する解析を行った。変動荷重係数の最大値 k_{ult} を鉄塔の最大耐荷力と評価した。

また、地震等に起因する地盤変状は基礎不同変位の要因となって鉄塔の損傷をもたらすことから、典型的な基礎不同変位モードを設定した。ここでは水平対角方向変位 u_H (開脚方向を正とする) と鉛直方向変位 u_V (上方向を正とする) を考えた。

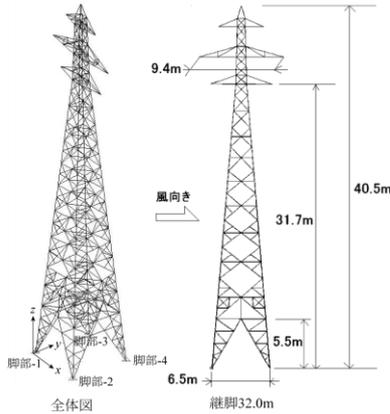


図 3 鉄塔の有限要素解析モデル (懸垂型標準鉄塔, 継脚 32.0 m)

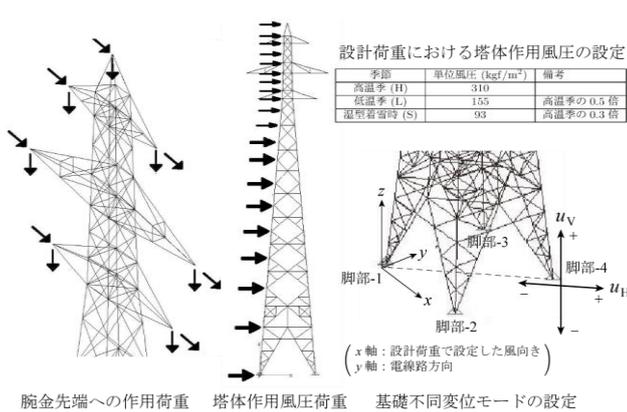


図 4 作用荷重と基礎不同変位モードの設定

(2) 鉄塔の耐荷挙動と部材損傷の評価

基礎不同変位が生じていない状態と基礎不同変位が生じている状態のふたつの場合を考え、それらの状態に荷重 F が作用したときの鉄塔の耐荷挙動と部材損傷の進展を評価した。

当研究グループによるこれまでの研究では、変動荷重係数 k をゼロから漸増させたときの鉄塔全体の耐荷挙動を検討していた。本研究ではこれに加えて、全部材の曲げ変形と伸び変形を定量化し、載荷に伴う部材損傷の進展挙動も検討した。部材損傷が顕著となる位置を特定するとともに、部材損傷の位置・程度と耐荷力低下挙動との関連性の解明を試みた。

なお、損傷後の点検時の状態を想定して、鉄塔が最大耐荷力をむかえて荷重がある値まで低下した状態から変動荷重係数 k がゼロとなるまで除荷を行い、その状態での部材変形も調べた。

(3) 損傷後の部材交換を模擬した修繕シミュレーション手法の開発

前述の(2)で部材損傷の定量化を行った結果として顕著な損傷が確認された部材の交換を模擬した修繕シミュレーション手法を開発した。これにより、修繕後の鉄塔の耐荷力回復程度を定量的に評価することを可能とした。この解析手法は、様々な損傷形態に対応した効率的な修繕方法の検討にも活用できると見込まれる。

4. 研究成果

(1) 鉄塔の耐荷挙動と部材損傷の評価結果

はじめに、基礎不同変位が生じていない状態に 3 種類の想定季節荷重を載荷したときの荷重-変位挙動を図 5 に示す。各想定季節荷重に対する鉄塔の最大耐荷力は、高温季(H)荷重で $k_{ult} = 3.32$ 、低温季(L)荷重で $k_{ult} = 3.83$ 、湿型着雪時(S)荷重で $k_{ult} = 2.23$ であった。この結果から、設計荷重における想定電線張力が最も厳しい設定である湿型着雪時(S)荷重に対して鉄塔は設計荷重の 2 倍以上、それ以外の想定季節荷重でも 3 倍以上の耐荷力を有していることが確認された。

高温季(H)荷重を載荷したケースで最大耐荷力 $k_{ult} = 3.32$ を示した後、荷重が $k = 2.59$ まで低下した状態から $k = 0$ まで除荷した状態での鉄塔の変形状態を図 6 に示す。図中のコンターは部材軸力 (単位: MN) である。最下腕金の下方 8 パネル目の風下側に位置する支柱材に顕著な曲げ変形が発生している。さらに下方の腹材用補助材の一部にも曲げ変形がみられる。

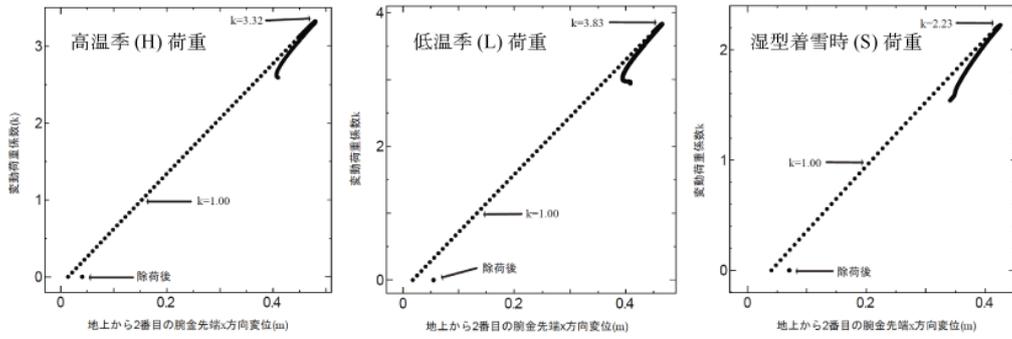


図5 鉄塔の荷重-変位挙動 (基礎不同変位が生じていないとき)

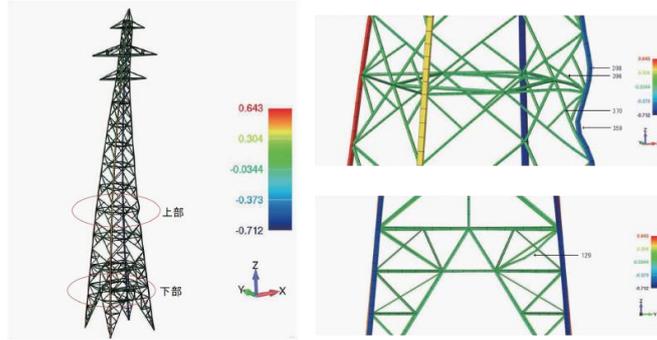


図6 鉄塔の変形と部材損傷の状態 (基礎不同変位が生じていないとき. 変形倍率5倍)

次に, 図4に示した風下側に位置する脚部-4に鉛直下方向の基礎不同変位 ($u_v = -36\text{mm}$) を与えた状態に高温季(H)荷重を载荷したときの結果を示す. JEC-127 (引用文献③) では基礎不同変位の許容目安を水平方向変位について鉄塔脚部根開き寸法の1/800, 鉛直方向変位について1/1200と定めており, $u_v = -36\text{mm}$ はその約6.7倍である. 荷重-変位挙動を図7に示す. 基礎不同変位が生じていないときの最大耐荷力は $k_{ult} = 3.32$ であったが (図5), 基礎不同変位により $k_{ult} = 1.80$ まで低下している. 鉄塔の変形状態を図8に示す. 鉄塔脚部付近に顕著な部材変形がみられる. 脚部-4への鉛直下方向の基礎不同変位により脚部-2と脚部-3の支柱材に圧縮軸力が発生し, さらに風下側に位置する脚部-2の圧縮軸力が大きくなって損傷が生じている.

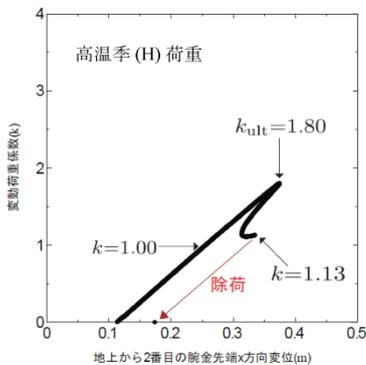


図7 鉄塔の荷重-変位挙動 (基礎不同変位 $u_v = -36\text{mm}$)

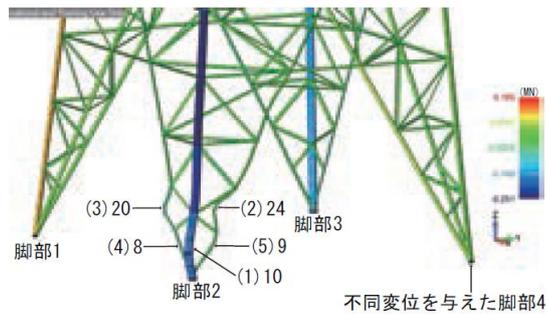


図8 部材損傷の状態 (基礎不同変位 $u_v = -36\text{mm}$, 変形倍率5倍)

部材損傷と最大耐荷力との関連性をみるため, 脚部-4に様々な大きさの基礎不同変位を与えた直後の部材たわみ w/L の最大値を横軸に取り, 高温季(H)荷重に対する最大耐荷力 k_{ult} を縦軸に取った図を図9に示す. ここでは鉛直下方向と水平対角開脚方向の基礎不同変位 u_v, u_H を与えたときの結果を示している. 比較対象として, 基礎不同変位が生じていない状態に対して载荷し, 最大耐荷力 k_{ult} を経て変動荷重係数 k が図中に示す値まで低下した状態から完全に除荷した状態での部材たわみ w/L の最大値を横軸に取った関係も示している.

この図から, 部材たわみ w/L が同程度であって

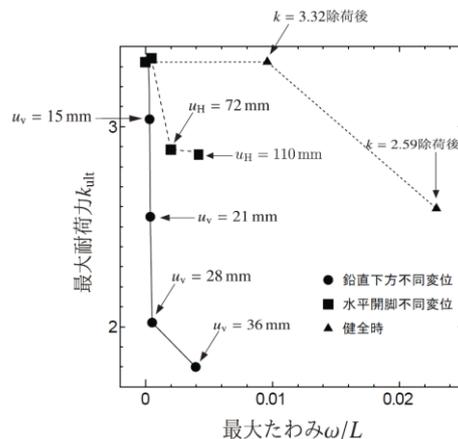


図9 部材損傷と最大耐荷力との関連

も、基礎不同変位の有無やその大きさ・方向によって健全時からの最大耐荷力の低下程度は大きく異なっていることが分かる。送電鉄塔の点検において鉄塔の健全性や残存耐荷力を適切に評価するためには、部材損傷の大きさだけでなく、部材損傷の位置や損傷の発生要因も考慮に入れることが重要である。

(2) 損傷後の部材交換を模擬した修繕シミュレーション

水平対角開脚方向の基礎不同変位 ($u_H = +6.1\text{mm}$) を与えた状態に対して高温季(H)荷重を載荷した場合について述べる。なお、この鉄塔では JEC-127 が定める水平方向の基礎不同変位の許容目安は 8.1mm であり、ここで考えた基礎不同変位はこの許容目安の範囲内である。

最大耐荷力は $k_{ult} = 3.33$ で、基礎不同変位が生じていないときと比べてわずかに大きい値を示した。その後、 $k = 2.91$ まで荷重が低下した状態での部材損傷の様子を図 10 に示す。図中のコンターは部材の回転角を示している。部材番号 359 の部材で最も大きな曲げ変形がみられた。

点検・修繕時を想定して $k = 0$ まで除荷し、その状態で部材番号 359 の部材を健全な部材に交換した後、再載荷する解析によって得られた荷重－変位関係を図 11 に示す。修繕後の最大耐荷力は $k_{ult} = 3.22$ であり、初回載荷時の最大耐荷力の約 96.7% まで回復することが確認された。また、結果の図示は省略するが、最大の曲げ変形を示した部材番号 359 に加えて、二番目に大きな曲げ変形を示した部材番号 398 も交換した解析も行った。その結果、最大耐荷力が約 97.0% まで回復することが確認された。

ここでは単一の損傷形態に対して修繕シミュレーションを実施し、修繕による耐荷力回復程度について例示的な検討を行った。しかしながら、損傷を受けた鉄塔に対する損傷度・健全性評価の定量的な判断目安を確立するためには、様々な損傷形態について網羅的に検討を行う必要がある。また、送電施設の維持管理・保守の実務では多様な損傷形態に対応した修繕工法が存在し、損傷程度に応じて適切なレベルの修繕がなされる。修繕工法や修繕レベルによる性能回復程度の違いについても今後検討の必要がある。

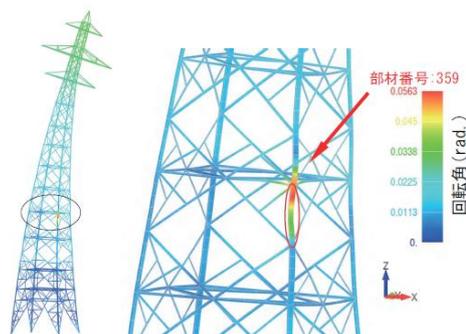


図 10 部材損傷の状態
(基礎不同変位 $u_H = +6.1\text{mm}$ ，変形倍率 10 倍)

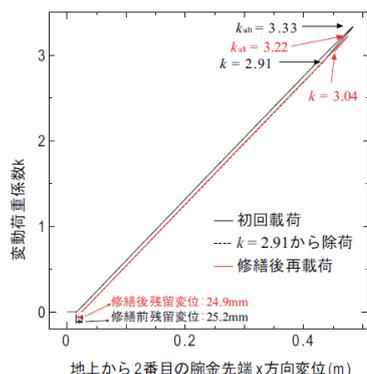


図 11 修繕前後の荷重－変位挙動

<引用文献>

- ① 福島第一原子力発電所内外の電気設備の被害状況等に係る記録に関する報告を踏まえた対応について (指示) に対する報告について，東京電力 (株)，平成 23 年 5 月 23 日発表資料。
- ② 平成 25 年度災害に強い電気設備検討調査 (送電鉄塔) 報告書，エネルギー総合工学研究所，2014 年 2 月。
- ③ 電気学会電気規格調査会標準規格，送電用支持物設計標準 (JEC-127-1979)，電気書院，1979。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① Youcen Fan, Hiroki Mizoe, Masayoshi Masuda, Yuki Yamakawa, Kiyohiro Ikeda, Effect of foundation displacement on strength degradation and Member damage of electric transmission tower, Japan-China Workshop on Analysis and Optimization of Large-scale Structures, 査読無，2018, pp. 14-17.
京都大学学術情報レポジトリ KURENAI: <http://hdl.handle.net/2433/231244>
- ② Jiahua Luo, Hiroki Mizoe, Masayoshi Masuda, Yuki Yamakawa, Kiyohiro Ikeda, Bearing capacity analysis of transmission tower foundation on slope crest, Japan-China Workshop on Analysis and Optimization of Large-scale Structures, 査読無，2018, pp. 18-22.
京都大学学術情報レポジトリ KURENAI: <http://hdl.handle.net/2433/231245>

- ③ Yuki Yamakawa, Kiyohiro Ikeda, Isao Saiki, Jacques Desrues, Reiko J. Tanaka, Diffuse bifurcations engraving diverse shear bands in granular materials, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 査読有, Vol. 42, No. 1, 2018, pp. 3–33.
DOI: 10.1002/nag.2711
- ④ 井口 拓哉, 福田 達也, 山川 優樹, 池田 清宏, 橋口 公一, 弾性予測子/リターンマッピングによる拡張下負荷面モデルの応力計算における負荷判定法の改良, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 査読有, Vol. 73, 2017, pp. I_363–I_375.
DOI: 10.2208/jscejam.73.I_363
- ⑤ 井口 拓哉, 山川 優樹, 橋口 公一, 池田 清宏, 変形勾配テンソルの乗算分解と超弾性構成則に基づく有限変形拡張下負荷面モデルの定式化とリターンマッピング法の開発, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol. 83, No. 848, 2017, p. 17-00008 (21 pages).
DOI: 10.1299/transjsme.17-00008
- ⑥ 井口 拓哉, 山川 優樹, 池田 清宏, 微小変形理論と超弾性構成則に基づく拡張下負荷面モデルの再定式化とリターンマッピング法の開発, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol. 82, No. 841, 2016, p. 16-00197 (20 pages).
DOI: 10.1299/transjsme.16-00197

[学会発表] (計 6 件)

- ① 樊 柚岑, 立崎 理久, 山川 優樹, 池田 清宏, 地震や台風により損傷を受けた送電鉄塔の部材変形の定量化と修繕による性能回復の評価, 平成 30 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 2019.
- ② 立崎 理久, 池田 清宏, 山川 優樹, 樊 柚岑, 送電鉄塔の強風や基礎不同変位による部材損傷と終局耐力低下挙動の評価, 平成 30 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 2019.
- ③ 羅 家驊, 溝江 弘樹, 増田 雅芳, 山川 優樹, 池田 清宏, 斜面近傍に位置する逆 T 字型送電鉄塔基礎の圧縮支持力解析, 平成 29 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 2018.
- ④ 福田 達也, 井口 拓哉, 山川 優樹, 池田 清宏, リターンマッピングによる拡張下負荷面モデルの応力計算における負荷判定法の改良, 平成 28 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 2017.
- ⑤ 井口 拓哉, 山川 優樹, 池田 清宏, 変形勾配テンソルの乗算分解に基づく有限変形拡張下負荷面モデルの定式化と数値実装, 平成 28 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 2017.
- ⑥ 井口 拓哉, 山川 優樹, 池田 清宏, 微小変形理論と超弾性構成則に基づく拡張下負荷面モデルの再定式化とリターンマッピング法の開発, 日本機械学会 M&M 2016 材料力学カンファレンス, 2016.

[その他]

ホームページ等

<http://msd.civil.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：池田 清宏

ローマ字氏名：(IKEDA, Kiyohiro)

所属研究機関名：東北大学

部局名：大学院工学研究科

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：50168126

※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。