

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 17 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560516

研究課題名（和文） 地震による送電鉄塔基礎の不等変位の高精度地盤解析による予測と鉄塔
余耐力の評価研究課題名（英文） Evaluation of ultimate behavior of transmission tower subjected to
unequal support movement by advanced computational geomechanics

研究代表者

池田 清宏（IKEDA KIYOHRO）

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50168126

研究成果の概要（和文）：

本研究では、地盤変形による送電鉄塔基礎の不等変位とそれに伴う鉄塔の損傷を定量的に評価し、地震経験後の送電鉄塔・基礎の健全性（補修・新設の要否や継続使用の可否等）を合理的に評価することを目的として、地震等による損傷後の送電鉄塔の健全性判定基準を策定するための基礎的検討を行った。三次元弾塑性解析によって地盤－基礎－鉄塔連成系の複雑な相互作用を評価し、地震時及び地震後における耐荷・変形性能を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

The objective of this research is to examine the ultimate strength of transmission tower subject to support movement. A series of three-dimensional nonlinear finite element analyses is performed for a soil-foundation-structure coupled system of the transmission tower to evaluate the effect of an imposed support movement on the strength and failure behavior of the entire system. The progressive failure of the members of the tower due to buckling and elongation is examined, and, moreover, the correlation between the local failure of the members and the degradation of the entire system is also discussed. Comparison between the tower with fixed supports and the system reveals that the support movement has a significant influence on the ultimate strength and the failure mode of the tower.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：地盤と構造物

1. 研究開始当初の背景

2007年7月の新潟県中越沖地震では、柏崎・米山地域の山間部傾斜地や砂質丘陵地で

地盤変形と基礎の不等変位による鉄塔部材の座屈損傷の被害が多く見られ、鉄塔の破棄・新設を余儀なくされた。

送電鉄塔は重要なライフラインであり、安定的な電力供給のために膨大な設備投資が国内で行われている。地震後の迅速な電力供給の復旧には、送電施設の健全性を判断する必要があるが、現状では外観の目視に基づく定性的な判定が行われている。そのため、電力実務では、補修・新設の要否や継続使用の可否等々を評価するための合理的な判定基準の策定が望まれている。

地震後の健全性評価（補修・新設の要否や継続使用の可否等の判断）を合理的に実施するためには、定量的・客観的な判定基準の策定が必要である。また、この種の事故を低減するためには、(1) 地震動による地盤変形・基礎変位の正確な評価、(2) 地盤・基礎・鉄塔の構成要素間の相互作用を考慮した全体系の耐荷・変形性能の正確な評価と、それを踏まえた設計が必要となる。

近年、各種地盤構造物の設計問題における破壊・変形の定量評価に対する有限要素法の適用性が検討されており、数値解析による地震時の地盤変形予測に関する研究が盛んに進められている。しかし、本研究で行ったような地震外力に対する地盤－基礎－鉄塔の連成挙動に関する研究は、本研究開始当初は見当たらなかった。

当時、研究代表者・研究分担者らは、鉄塔基礎の引揚支持力問題や、地震動や風荷重の地盤・基礎・鉄塔系への伝播問題に関する研究を行い、(1) 鉄塔基礎の周辺地盤は基礎を介して鉄塔による拘束を受け、複雑な挙動を呈すること、(2) 鉄塔基礎は通常4基からなり、各々が異なる外力を受け、また、隣接基礎の影響により支持力が低下するので、1基ごとの支持力照査では危険側の評価となること、(3) 鉄塔は脚部基礎の微小な変位によっても著しく座屈耐荷力が低下する鋭敏な構造であること、(4) そのため、地盤変形と基礎変位を高精度に評価することが必要となること、を明らかにしていた。

この知見を踏まえ、地盤変形による送電鉄塔基礎の不等変位とそれに伴う鉄塔の損傷を定量的に評価するためには、鉄塔－基礎－地盤連成系の三次元大変形・弾塑性挙動を高精度に評価できる数値解析技術の開発と、それを用いた検討が不可欠であった。

2. 研究の目的

本研究では、地盤変形による送電鉄塔基礎の不等変位とそれに伴う鉄塔の損傷を定量的に評価し、地震経験後の送電鉄塔・基礎の健全性（補修・新設の要否や継続使用の可否等）を合理的に評価するための判定基準を提案することを目的とする。

地震による送電鉄塔施設の被害調査に基づき設定した地盤の典型的な破壊形態を対象とし、地盤変形の高精度予測評価を踏まえ

た送電鉄塔全体系の挙動を三次元大変形・弾塑性解析によって評価し、地盤－基礎－鉄塔連成系の複雑な相互作用を解明することにより、地震時及び地震後における耐荷・変形性能を明らかにする。

その結果を踏まえ、地震後の送電施設の健全性判定基準の策定、ならびに今後の性能設計に対応した送電施設の照査設計法の確立に資することも本研究の目的とする。

3. 研究の方法

本研究の目的である地盤変形による送電鉄塔基礎の不等変位とそれに伴う鉄塔の損傷の評価を行うための解析ツールとして、地盤－基礎－鉄塔連成系の三次元大変形・弾塑性挙動を高精度に評価できる数値解析システムを開発し、基礎周辺地盤の変形性能を明らかにした。具体的には、下記の研究項目(1)～(6)を実施することにより、研究を遂行した。

(1) 鉄塔・基礎の被害状況に関する現地調査を行い、基礎周辺地盤の代表的な破壊形態を抽出する。

(2) 高度な構成モデルの数値実装により地盤変形と基礎不等変位の高精度予測評価を実現し、さらに、地盤－基礎－鉄塔連成系の三次元大変形・弾塑性挙動を評価できる数値解析システムを開発する。

(3) 数値解析に用いる土質定数の設定法を策定し、解析対象地盤の土質定数を決定する。

(4) 地盤－基礎－鉄塔連成系のモデル生成・解析実行プラットフォームの構築を行う。

(5) 前述の(1)で抽出した地盤・基礎の破壊形態について、(4)で開発した解析システムを用いて地盤－基礎－鉄塔連成解析を行い、構成要素間の相互作用を考慮した連成系の変形特性を評価する。

(6) 前述の(5)の結果に基づき、地震後における基礎の健全性と鉄塔の余耐力を迅速かつ合理的に評価・判断するための客観的な判定基準の策定を念頭に置いた基礎的知見を整備する。

4. 研究成果

はじめに、地震による送電施設の被害と鉄塔・基礎の破壊状況に関する情報収集を行った。2007年7月の新潟県中越沖地震による長岡・柏崎・米山地域での鉄塔・基礎の被害状況に関する現地調査や既往の文献調査に基づき、典型的な基礎周辺地盤の破壊形態および基礎不等変位モードを抽出した（図-1、図-2）。これまでの現地調査で観察された、地盤破壊に対する4基の鉄塔基礎による拘束効果や、基礎施工時の掘削・埋戻しによる原地盤の強度低下の影響の定量評価も重要課題とした。

次に、地盤変形の高精度予測のための高度

な構成モデルの数値実装を行った。本研究で地盤の変形解析に用いる陰解法有限要素法に基づく弾塑性有限変形解析手法は、研究代表者・研究分担者らが長年に渡り開発を進めてきたものである。一般に鉄塔は多数の細長部材で構成され、脚部基礎の微小な変位によっても著しく座屈耐荷力が低下する鋭敏な構造である。このため、地震による地盤変形を高精度に評価することが必要となる。そこで、予測精度向上のため、高度な弾塑性構成モデルを導入した。その際、厳しい解析条件でも高精度かつロバストな求解を実現した。

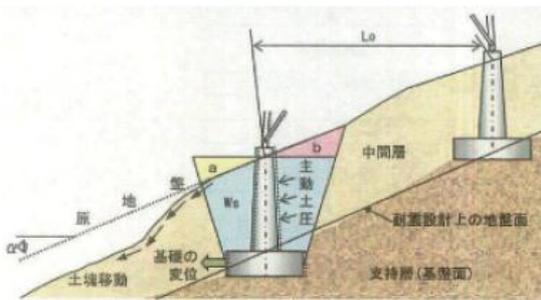
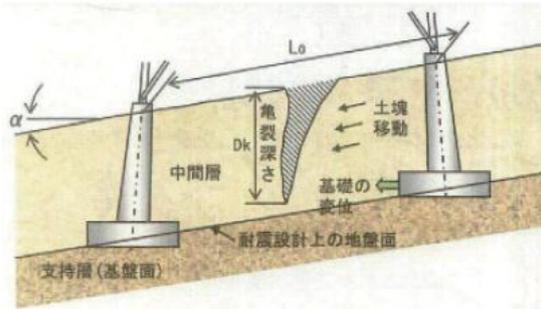


図-1: 地盤変形による亀裂や基礎の不等変位による鉄塔脚部の根開き拡大

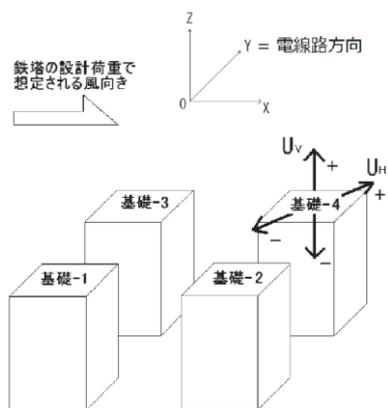


図-2: 解析で想定した基礎不等変位モード

つづいて、数値解析に用いる土質定数の設定法の策定を行った。再現性の高い解析結果を得るためには土質定数の設定が重要である。特に変形予測においては、破壊に関わる定数もさることながら、塑性変形の発展則パ

ラメータや微小変形段階でのせん断剛性等が重要となる。今回の検討対象である柏崎・米山地域の現地土を参照し、パラメトリック・スタディにより構成モデルの応答感度を調べ、解析対象地盤の土質定数を決定した。

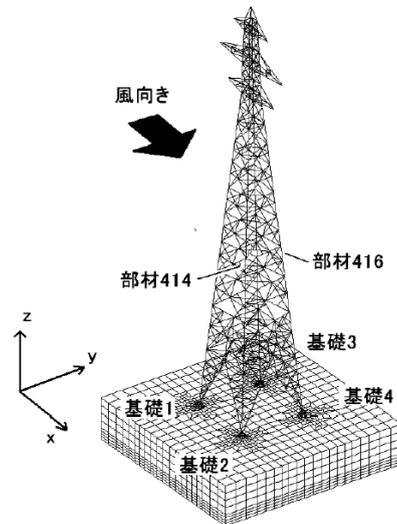


図-3: 鉄塔-基礎-地盤全体系の有限要素解析モデル

また、地盤-基礎-鉄塔連成系のモデル生成(図-3)と解析実行プラットフォームの構築を行った。送電鉄塔全体系の有限要素解析においてモデル生成と解析を効率的に行うためのプラットフォームの整備を行った。その際、鉄塔は用地制約から斜面や尾根など複雑な地形・地質条件に立地する機会が多いため、三次元的に複雑な地形・地質を有する地盤の構造・物性情報を解析モデルに反映させるとともに、鉄塔は複数種の断面形状を有する多数の部材で構成され、部材間の接合方法などの再現が部材座屈の解析結果を大きく左右するため、それらの正確な再現を行った。

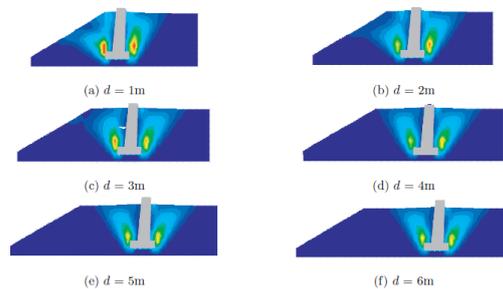


図-4: 法面近傍に設置された基礎引揚げにおける周辺地盤の変形状況

構築した解析プラットフォームを用いて、地盤変状による送電鉄塔基礎の支持力低下挙動の検討を行った。地震等による基礎周辺地盤の変状や土かぶり喪失等を想定した数値解析を行い、地盤変状による逆T型基礎の支持力低下挙動を検討した(図-4)。その結果、

地盤変状の程度と基礎の支持力低下挙動との関係が明らかとなり、地盤変状後の基礎の健全性を合理的・客観的に評価するための基礎的知見を得た。

さらに、先と同じ解析プラットフォームを用いて、地盤-基礎-鉄塔連成解析による送電鉄塔構造全体系の耐荷力・変形特性の評価。基礎に不同変位が生じたときの地盤-基礎-鉄塔系の三次元大変形・弾塑性解析を行い、地震後における基礎および鉄塔の余耐力評価を行った。具体的には、典型的な地盤変状において想定される様々な方向・大きさの基礎不同変位が発生した状況を想定し、基礎不同変位後の地盤-基礎-鉄塔構造系に対して鉄塔設計で想定される各種の季節荷重が作用する場合に、鉄塔がどの程度の終局耐荷力を保持しているかについて調べた。さらに、基礎不同変位の進展と作用荷重の増加に伴って、鉄塔部材の損傷がどのように進展するか(図-5)、また、基礎変位がどの程度発生するかについても詳細に検討を行った(図-6)。

以上の研究成果により、地震後における基礎の健全性と鉄塔の余耐力を迅速かつ合理的に評価・判断するための客観的な判定基準を策定するための基礎的知見を整備することができた。

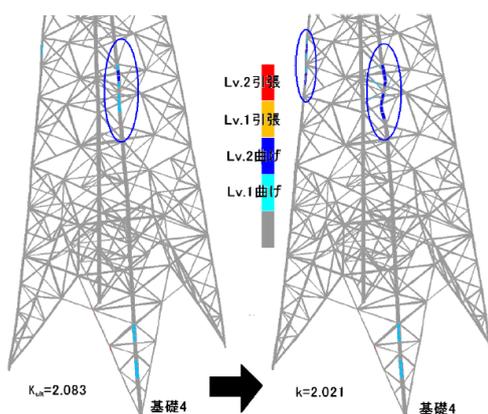


図-5: 荷重増加に伴う部材損傷の進展

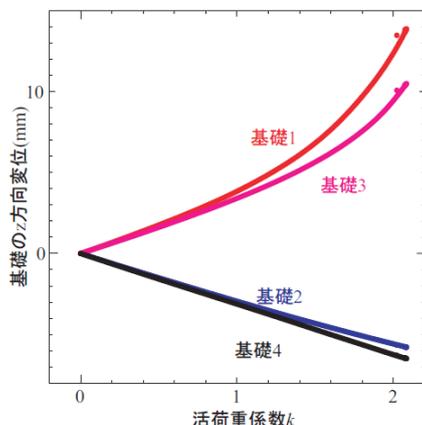


図-6: 荷重増加に伴う基礎鉛直変位の進展

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

1. 山川優樹, 橋口公一, 詳説: 弾塑性力学, 有限変形弾塑性構成式の数値計算法: 移動硬化に関する乗算分解を用いたモデル, その1~3, 機械の研究, 査読無, 第63巻第11号(2011), pp.977-981, 第63巻第12号(2011), pp.1053-1058, 第64巻第1号(2012), pp.75-79.
2. 山川優樹, 橋口公一, 詳説: 弾塑性力学, 有限変形弾塑性構成式の数値計算法, その1~5, 機械の研究, 査読無, 第63巻第1号(2011), pp.64-69, 第63巻第2号(2011), pp.135-138, 第63巻第3号(2011), pp.251-254, 第63巻第4号(2011), pp.330-334, 第63巻第5号(2011), pp.423-430.
3. 山川優樹, 池田清宏, 田村崇, 砂の平面ひずみ供試体における拡散型分岐モードの抽出, 土木学会論文集C, 査読有, Vol.66, No.4, pp.671-683, 2010.
4. 山川優樹, 山口洋介, 橋口公一, 池田清宏, 拡張下負荷面 Cam-clay モデルの有限変形理論に基づく定式化とリターンマッピングを用いた陰的応力更新法, 応用力学論文集, 土木学会, 査読有, Vol.13, pp.411-422, 2010.
5. Yuki Yamakawa, Koichi Hashiguchi, Kiyohiro Ikeda, Implicit stress-update algorithm for isotropic Cam-clay model based on the subloading surface concept at finite strains, International Journal of Plasticity, 査読有, Vol.26, pp.634-658, 2010.
6. Kiyohiro Ikeda, Makoto Ohsaki, Kentato Sudo, Toshiyuki Kitada, Probabilistic analysis of buckling loads of structures via extended Koiter law, International Journal of Structural Engineering and Mechanics, 査読有, Vol.32, pp.167-178, 2009.

[学会発表] (計7件)

1. 山川優樹, 千田大, 池田清宏, 橋口公一, 塑性変形勾配テンソルの乗算分解による有限変形・非線形移動硬化弾塑性モデル, 第61回理論応用力学講演会, 2012年3月7~9日, 東京大学生産技術研究所(東京).
2. 山川優樹, 橋口公一, Unconventional finite strain theory based on the subloading surface model: II. Numerical analysis, 第60回理論応用力学講演会, 2011年3月8~10日, 東京工業大学大岡山キャンパス(東京).

3. 千田大, 山川優樹, 池田清宏, 逆 T 型基礎の引揚支持力評価への弾塑性有限要素解析の適用性に関する考察, 平成 22 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 2011 年 3 月 5 日, 東北工業大学 (仙台市).
4. Bui Huu Truong, 箕輪健太郎, 山川優樹, 池田清宏, 地盤－基礎－送電鉄塔の連成作用を考慮した三次元解析と基礎の安定性の検討, 平成 22 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 2011 年 3 月 5 日, 東北工業大学 (仙台市).
5. 箕輪健太郎, 山川優樹, 池田清宏, 中市翔也, 地盤－基礎体－構造物の相互作用を考慮した送電線鉄塔系の安定性解析, 土木学会全国大会第 65 回年次学術講演会, 2010 年 9 月 1～3 日, 北海道大学 (札幌市).
6. 箕輪健太郎, 山川優樹, 池田清宏, 中市翔也, 地盤－基礎体－構造物の相互作用を考慮した送電線鉄塔系の安定性解析, 平成 21 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 2010 年 3 月 6 日, 日本大学工学部 (郡山市).
7. 山川優樹, 藤井文夫, 非対称な接線剛性行列の LDU 分解情報による分岐モードの抽出法, 第 58 回理論応用力学講演会, 2009 年 6 月 9～11 日, 日本学術会議 (東京).

[その他]

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

池田 清宏 (IKEDA KIYOHIRO)
東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号 : 50168126

(2) 研究分担者

山川 優樹 (YAMAKAWA YUKI)
東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号 : 80324010

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :