

# 電中研 NEWS の研

電中研ニュース

No.483  
2017 Mar



電力施設建設・保全

## 送電用鉄塔の巨大地震に対する耐震性評価技術の構築と活用

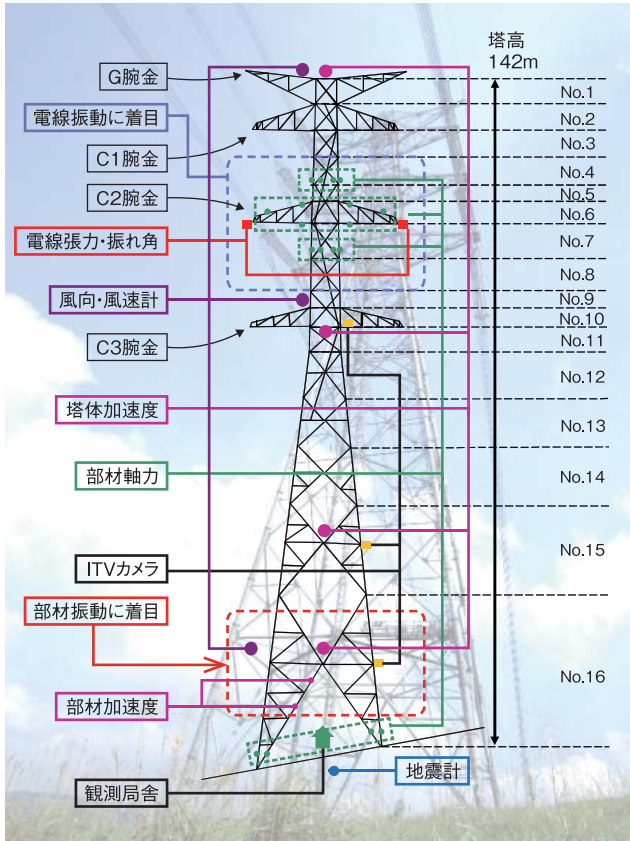
- 地震動レベルに応じた耐震性能評価手法の開発 -



送電用鉄塔の外観

電力輸送を支える送電用鉄塔(以下では、鉄塔)は、現在、全国で約25万基が運用されています。鉄塔は、特殊な形状を除いて地震動による直接の影響が小さいため、風を支配的な荷重とする設計が行われています。ただし、地盤被害、すべり、沈下、液状化の影響を受ける可能性があるため、一般建築物の基準に従い基礎と鉄塔の耐震性を確保しています。一方、2011年東北地方太平洋沖地震を契機に、社会基盤設備全体の巨大地震に対する保守運用に備えるため、鉄塔が保有する耐震性能の解明が必要となっています。また、送電用鉄塔設計標準(JEC-TR)の発刊(電気学会:2015)に伴い、今後の鉄塔設計では耐震設計が導入されていく予定です。当研究所では、鉄塔の耐震性能の解明と耐震設計技術の高度化に向けた各種研究に取り組んでいます。

## 実機観測に基づく送電用鉄塔の振動挙動



(a) 観測で使した計測機器の配置



(b) 使用した計測機器の外観

図-1 計測器の配置と観測状況

目的に応じて計測機器を配置させ、観測システムを用いて計測しています。

### 実機鉄塔による地震時の振動挙動と分析

当研究所では、自然環境下での鉄塔の外力に対する応答を把握するため、実機観測に基づく計測・分析を進めています。500kVの送電用鉄塔(高さ142m)を観測対象として、通信回線により遠隔での観測状況の確認や観測条件を変更可能な観測システムを構築して、観測を実施しました(図-1)。観測目的は、①風、地震による鉄塔応答の基礎データ取得、②微風下で発生する部材振動の原因究明、③ギャロッピングに代表される大振幅の電線振動が鉄塔応答に及ぼす影響の解明、です。本稿では、主に①の成果を報告します。

鉄塔の各種応答を評価するには、作用と応答の関係性を把握することが必要となります。このため、観測では、作用側の情報として風(風向・風速)や地震などに代表される自然外力を、応答側の情報として加速度や電線張力・振れ角などを同時に計測して相関を調べています。2010年12月から本格的に観測を開始し、2011年東北地方太平洋沖地震における応答が観測できました。

観測した地震波では、短周期の応答への影響度が大きく、鉄塔応答においても1Hzを越える高振動数のピークが観測されました(図-2)。また、鉄塔全体だけでなく個別の部材が地震時に振動するとともに、作用する部材の軸力が変化する様子を観測できました。これらの結果をもとに、地震時の減衰特性(摩擦などによって生じる抵抗力)の分析や数値解析を活用した地震時応答の再現についても検討を進めています。

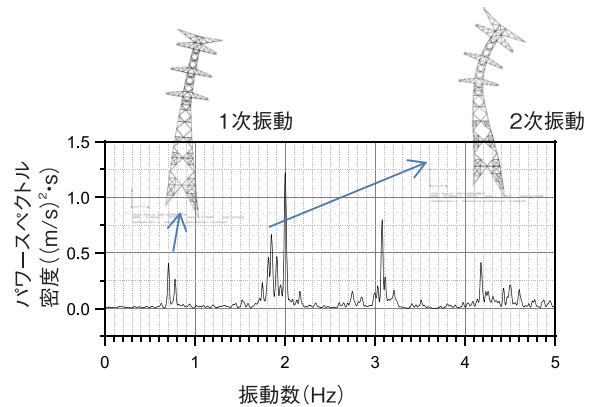


図-2 鉄塔頂部における加速度波形の振動振幅と振動数との関係  
0.7Hzと2.0Hz付近のピークは、鉄塔の1次振動と2次振動の応答と呼ばれます。2次振動のピーク値が大きく、鉄塔に支配的な応答を示しています。

# 2

## 巨大地震に対する耐震性能評価に向けた取り組み

### 耐荷力と損傷過程の解明

鉄塔に関して、南海トラフ巨大地震に代表される高レベル地震動（設備使用期間に極めて稀に発生する地震動）による損傷形態や、最終的にどのように倒壊に至るのか、といった観点での知見が不足しています。そこで、鉄塔の損傷過程の解明のために、高さ約80mの送電用鉄塔の一部を7分の1に縮小した模型を製作して力を付加する実験を実施し、荷重と変形性能の関係を調べました（図-3）。

その結果、荷重の増加とともに鉄塔部材が損傷していく過程や、その最大耐荷力に達した後に緩やかに耐荷力が低下する特性を有していることを確認しました。また、既往の解析手法を用いた実験結果を再現するためのモデル化手法を検討しています（図-4）。引き続き、今回の実験とは異なる荷重条件下での損傷過程の分析や、再現性の高いモデルの確立に取り組んでいく予定です。

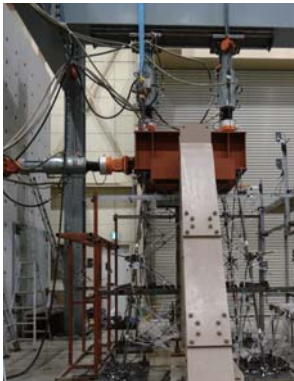


図-3 模型実験の状況

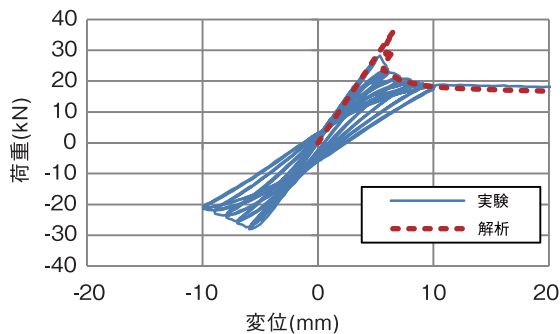


図-4 縮小模型実験における荷重と変位の関係

### 減衰特性の解明

鉄塔は部材同士をボルトで接合しているため、地震時に接合部の滑り（接合部のずれ）により振動エネルギーが吸収される効果があると考えられています。実験や実機観測により、その効果の定量的な評価が試みられていますが、その実態は十分に解明されていません。そこで、2枚の鋼板をボルトで締結し、1方向に引張力と圧縮力を交互に繰返し作用させ、接合部の変位（接合部のずれ）と荷重の関係を調べました（図-5）。

実験の結果、交互の繰返し力の作用に対し、接合部がずれ始める荷重（滑り荷重）以下では、部材の変形と荷重が線形的に増加し、滑り荷重に達すると、ほぼ一定の荷重で変位が増加することがわかります。変位が更に増大すると、ボルト穴で滑る隙間が無くなり孔壁に接触すると再び荷重が増加することを確認しました（図-6）。今後は、解析によるボルト滑りの特性による減衰効果の把握と振動台実験による減衰特性の解明に取り組みます。



図-5 ボルト接合部の滑り実験の試験体の設置状況

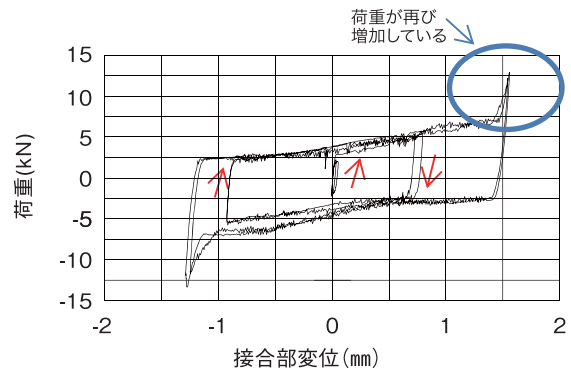


図-6 接合部における変位—荷重関係の一例  
矢印は、交互の繰返し力を作用させた過程の経路を示しています。



## 応答スペクトル法に基づく地震荷重評価法の構築

- 実務への適用に向けた取り組み -

### 鉄塔・架渉線連成系モード解析プログラムの開発

鉄塔は、地震動による直接の影響に比べて風が支配的な外力であるため、風速40m/sの風荷重に耐えることを基本とする考え方で設計されてきました。従来、一般建築物の基準に沿って、鉄塔本体(特殊な形状を除く)と基礎地盤の耐震性を確保しています。一方、2011年東北地方太平洋沖地震を契機に、「送電用支持物設計標準」(JEC-TR)において耐震設計に関する項目が追加されました。JEC-TRは、移行期間を経て設計に取り入れられる予定ですが、具体的な計算方法の記述が乏しく、そのままでは実務適用が難しいと考えられています。

そこで、当所ではJEC-TRに記載された簡便な設計水平地震力の計算法を高度化し、使用する係数を導く設計手法についての検討を以前より進めてきています。その過程において、応答スペクトル法\*に基づく評価法を構築し、各部材に作用するモーメントや軸力を評価できる「鉄塔・架渉線連成系モード解析プログラム」を開発しました(図-7)。

同プログラムでは、送電用鉄塔の構造から自動的に対応する簡易モデル(図の串団子状モデル)を作成して、振動特性として固有振動数と固有振動分布を自動で計算します。その結果における主要な振動分布の組み合わせから、入力地震動特性に応じた層せん断力(図の質量(●)に作用する水平力)と層モーメント(図の質量(●)に作用する回転力)の計算、さらには部材(支柱材:鉄塔構造の骨格をなす部材、腹材:骨格に対して補助的に接合される部材)の軸力の計算が可能です。

今後は、同プログラムを用いて、①鉄塔規模、②架線形式、③架線状態、などをパラメータとした計算結果から、様々な条件に対応可能な評価手法を構築して、実務で運用可能な簡便な計算手法を開発していく予定です。

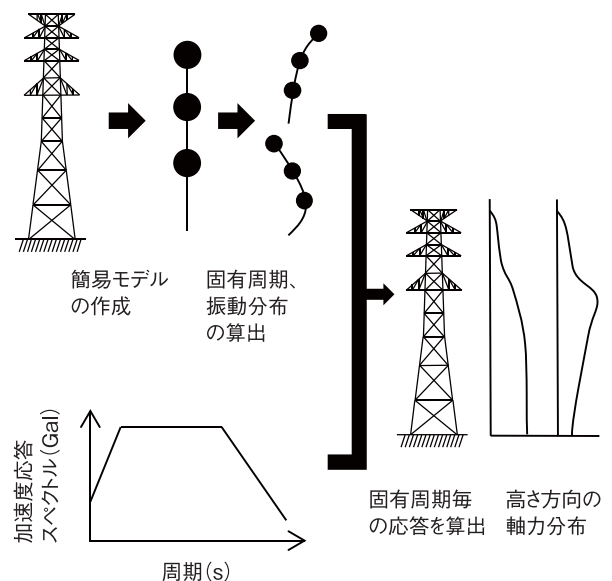


図-7 応答スペクトル法\*に基づく地震荷重評価の流れ

\*: 単一の串団子状モデルで固有周期と減衰定数を種々に変えて、任意の地震波に対する最大応答を求める応答スペクトル(図参照)を用いて、構造物の最大変位、最大応力などを計算する方法

## ひとこと

本研究では、送電用鉄塔の耐震性能に着目しており、東北地方太平洋沖地震以降のインフラ設備の耐震性能への関心の高さから、重要な研究テーマの1つと位置づけて、当研究所専門家が丸ごと研究に取り組んでおります。研究の推進にあたっては、電力会社の方々より貴重なご意見をいただいております。今後、導入される耐震設計の実務に活用可能な形に早期に成果を取りまとめ、電気事業や社会へ貢献していきたいと考えております。

地球工学研究所 主任研究員 佐藤 雄亮



| 関連する論文等 |

・電気学会：電気学会 電気企画調査会テクニカルレポート 送電用鉄塔設計標準, JEC-TR-00007, 2015.

・佐藤雄亮：Seismic Performance of a Steel Transmission Tower during the 2011 Great East Japan Earthquake, 16-th World Conference Earthquake Engineering, Santiago, Chili, 2017.