

## ボルト接合部滑りを考慮した部分鉄塔模型の振動台実験と再現解析

電力中央研究所 正会員 ○高島 大輔

## 1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震を契機に、送電用鉄塔の大規模地震に対する耐震性評価が要求されるようになった。本研究では、非線形応答による減衰効果が見込まれるボルト接合部滑りに着目し、大振幅時の応答評価法の確立を目的としている。

これまでに、要素実験を実施し、接合部滑りの履歴特性を把握し、その構成則を提案した<sup>1)</sup>。本稿では、局所的な接合部滑りが構造物全体の地震時挙動に及ぼす影響の把握、および接合部滑りを考慮した数値解析モデルの開発を目的に、部分鉄塔模型を実施した。

## 2. 振動台実験の方法

標準的な 66kV 山形鋼鉄塔(塔高 28.6m, 根開き 4.72m)の中間 2 パネルの実物大を用いて、振動台実験を実施した。図 1 に試験体の全景と、計測項目とその計測位置、加振方向および向きの定義を示す。試験体は下側のパネル(パネル 1)と上側のパネル(パネル 2)の 2 パネルから構成され、パネル 1 の高さおよび下端幅は、1.5m, 2.15m, パネル 2 の高さおよび下端幅は、1.4m, 1.89m である。パネル 1 の左右側面とパネル 2 では、接合部滑りが発生しないように、高力ボルトを用いた上、3 倍の既定トルクで締付けた。一方、パネル 1 の前面・後面の接合部では、表 1 に示す実験ケースに応じて締付けトルク(ボルト軸力)を調節した。すなわち、TypeA では接合部滑りが発生しないように強固にボルトを締付ける一方、TypeB では接合部滑りが発生しうる大きさのトルクで締付けた。なお、ボルトのサイズは、全て M16 である。また、作成した試験体は 1 体で、両ケースで同一の試験体を使用した。試験体の上部に合計 3t の重錘とその治具を設置し、試験体の共振振動数を調整した。これは、振動台の加振性能範囲内で試験体を共振(共振振動数 12Hz)させるためである。

実験では部材軸力、振動台加速度、試験体加速度と変位、接合部変位およびボルト軸力を計測した。部材軸力は、パネル 1 の前面・後面の支柱材および腹材を対象に、部材交点部の中点で計測した。試験体加速度

表 1 実験ケースと締付け条件

| 名称    | 締付け軸力    | 備考      |
|-------|----------|---------|
| TypeA | 100kN 以上 | 滑りなしモデル |
| TypeB | 30kN     | 滑りありモデル |

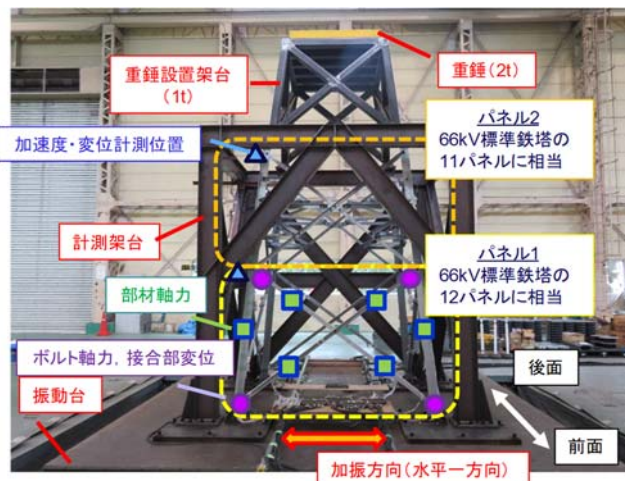
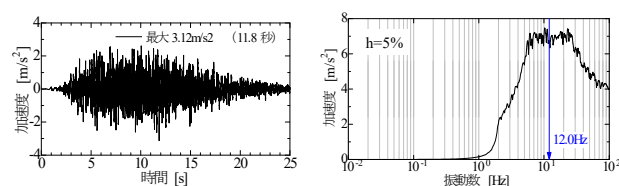


図 1 部分鉄塔模型の設置状況



(a)加速度時刻歴波形 (b)加速度応答スペクトル

図 2 人工地震波

および変位は、パネル 1 とパネル 2 の上部で計測した。接合部変位およびボルト軸力は、パネル 1 の前面・後面を対象に、支柱材と腹材の接合部で計測した。

加振波にはランダム波とスイープ波を用いた。ランダム波には図 2 に示す人工地震波を用いており、加速度波形の最大値が 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 7.5, 10.0, 11.5, 15.0 m/s<sup>2</sup> になるように加速度振幅を調整した波形を用いた。スイープ波は試験体の減衰定数を評価するために実施し、その振動数は 3 ~ 13.6 Hz, 加速度振幅は、0.05, 0.1, 0.15, 0.20 m/s<sup>2</sup> とした。

## 3. ボルト接合部滑りの数値解析モデル

汎用有限要素解析コード Abaqus を用いて接合部滑りを考慮した数値解析モデルを構築した。図 3 に示すように、ボルト接合部を含む要素を、(1)接合部滑りを考

キーワード 送電用鉄塔, ボルト接合部滑り, 振動台実験

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 (一財)電力中央研究所 地球工学研究所 TEL 04-7182-1181

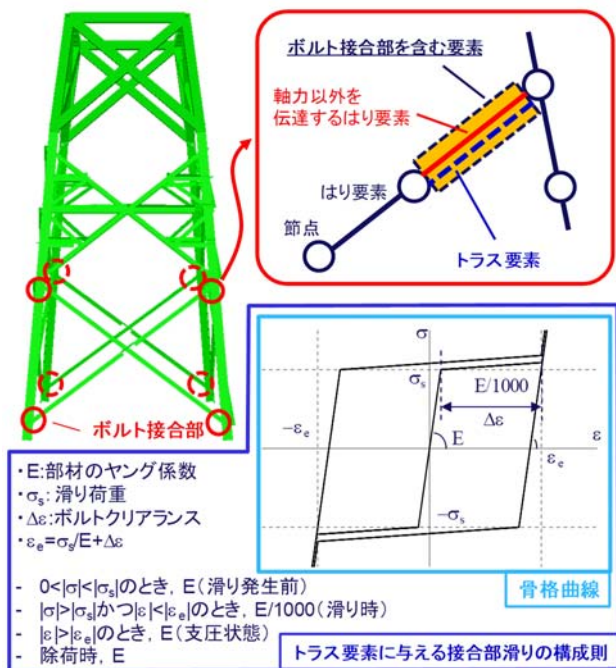


図3 接合部滑りの数値解析モデル

慮するためのトラス要素, (2)軸力以外を伝達するはり要素 (補助要素) の二重要素でモデル化し, トラス要素に接合部滑りの構成則を与えた. 同モデルの妥当性を検証するため, 振動台実験の再現解析を実施した.

#### 4. 振動台実験および再現解析の結果

##### (1) 振動台実験の結果

図4にランダム波加振における部材軸力 (主柱材) および応答加速度と入力加速度との関係を示す. ここで, 入力加速度は振動台上の加速度である.

接合部滑りが発生しない TypeA では, 応答値は入力加速度に概ね比例している. 一方, TypeB では, 入力加速度が  $5 \sim 7 \text{ m/s}^2$  あたりまでは, 応答値は入力加速度に比例し, それ以降では, 減少する傾向にある. これは, 接合部滑りが発生したためである. ただし,  $12 \text{ m/s}^2$  あたりで再び増加傾向になっており, これはボルトがボルト孔に接触する支圧状態になるためと推測される.

図5にスイープ波加振における, TypeB のパネル2上部の応答加速度の伝達関数を示す. 入力加速度の増加とともに, 共振ピークの振動数および応答倍率が減少, つまり, 減衰が増加していることが確認できる.

##### (2) 再現解析の結果

図6にランダム波加振における部材軸力および応答加速度と入力加速度との関係を示す. 再現解析においても, 接合部滑りが発生しない TypeA では, 応答値が入力加速度に比例している. また, TypeB では, 入力加

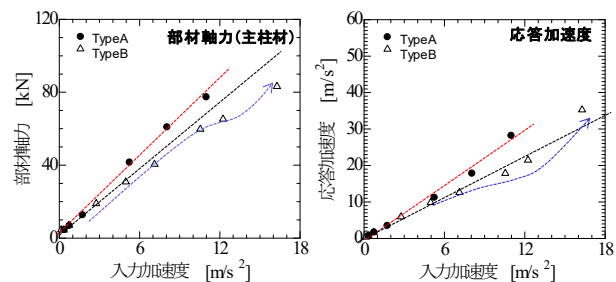


図4 入力加速度と応答の関係 (振動台実験)

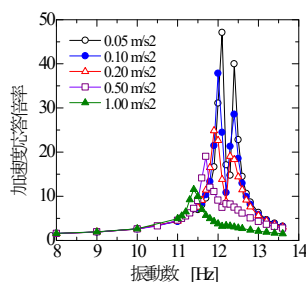


図5 スイープ波加振の結果 (振動台実験)

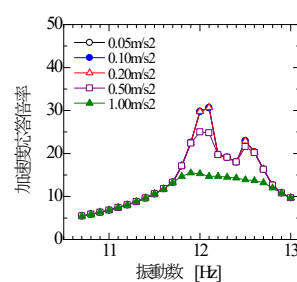


図7 スイープ波加振の結果 (再現解析)

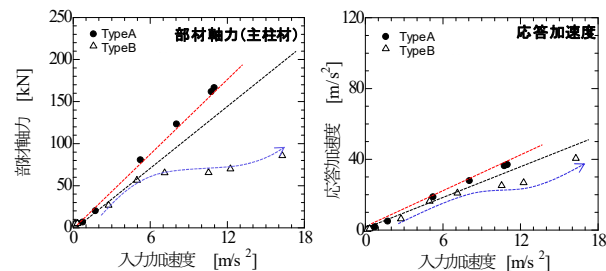


図6 入力加速度と応答の関係 (再現解析)

速度が  $5 \text{ m/s}^2$  までは, 応答値が入力加速度に比例し, それ以上の入力加速度では, 一度減少傾向となり,  $12 \text{ m/s}^2$  あたりで再び増加傾向となる. これらの傾向は, 実験結果とよく一致している.

図7にスイープ波加振における, TypeB のパネル2上部の応答加速度の伝達関数を示す. 共振ピークが実験結果に比べて明瞭ではないものの, 共振ピークの振動数および応答倍率が減少し, 減衰が増加している点について, 実験結果と一致しているといえる.

#### 5. まとめ

部分鉄塔模型を用いた振動台実験により, 接合部滑りの発生によって, 発生する部材軸力や応答加速度が減少すること, 減衰が増加することが確認された. また, 構築した数値解析モデルにより, これらの影響を再現できることを確認した.

#### 参考文献

- 1) 高島大輔, 早田直広: ボルト接合部滑りを考慮した送電用鉄塔の地震応答解析手法の開発 (その1), 電力中央研究所, 研究報告, N17002, 2017