

# 気中断路器の耐震解析

論文

■ 大山 友幸  
Tomoyuki Oyama

■ 神田 一彦  
Kazuhiro Kanda

■ 永田 清志  
Kiyoshi Nagata

## 1 はじめに

東北地方太平洋沖地震以降、解析による断路器の耐震解析評価のニーズが高まっている。現在では、地震被害を受けた機器の原因究明を目的とした耐震解析や、機器設置地点での想定地震動に対する耐震解析、耐震対策を施した部位の妥当性評価など、精緻な解析モデルを作成しての耐震評価が一般的となってきた。

本稿では、気中断路器の耐震解析の最新動向として、精緻化解析手法、および非線形解析についての取組みを紹介する。

## 2 精緻化解析

### 2.1 機器の被害状況

東北地方太平洋沖地震によって、水平二点切断路器のがいし基部金具が破損した事象がある。図1に導電部を支える回転がいし部の下端に位置するがいし基部金具が破損して、回転がいし装置が傾いた状況、およびがいし基部金具破損部の詳細を示す。

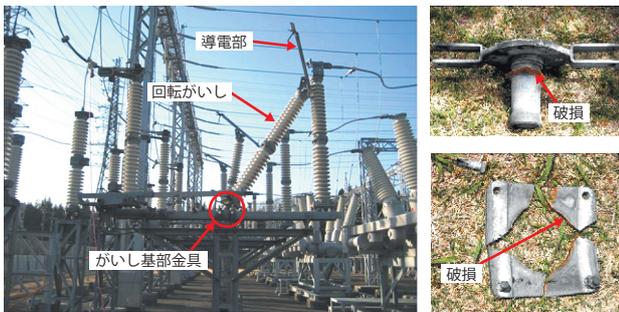


図1 がいし基部金具の被害器

### 2.2 がいし基部金具の解析手法

従来は、がいし基部金具の危険断面部の曲げモーメントと断面係数から発生応力を机上計算していたが、それでは金具部に局部的に応力集中したときの発生応力が計算されず、実態よりも低い応力値となることがわかってきた。そこで、最新の解析手法として、がいし基部金具の応力評価については、動的解析と静的解析を組み合わせた2段階解析で評価する手法を採用している。

2段階に分けて解析する理由としては、これまで作成してきた多種ある断路器の解析モデル、および解析結果を利用しつつ、がいし基部金具の詳細な解析を行うため

である。評価部位のがいし基部金具部のみを取り出し、三次元ソリッドモデルで静的解析をして、動的解析結果と掛け合わせることで、解析精度が向上し、解析の効率化も図れる。

具体的な解析手順を以下に示す。

#### (1) 解析手順① 曲げモーメントの算出

機器全体の精緻な三次元モデルを作成して、動的解析(時刻歴直接積分応答解析)でがいし基部金具に作用する曲げモーメントを算出する。作成した三次元モデルを図2に示す。

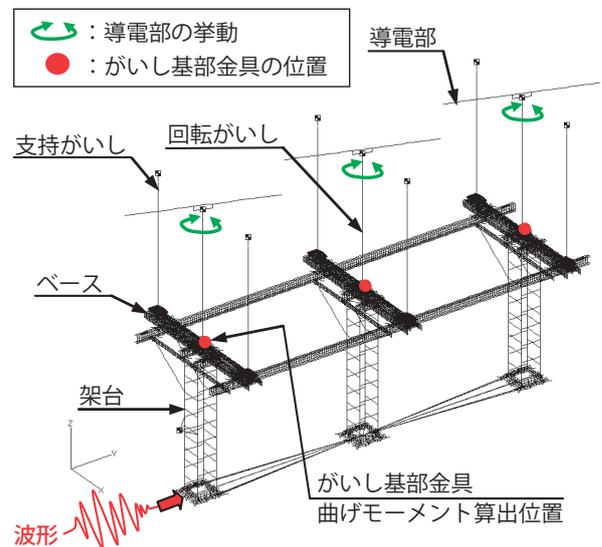


図2 機器全体の三次元モデル

#### (2) 解析手順② 最大応力が発生する曲げ角度の算出

評価波形を入力した場合のがいし基部金具に最大応力が発生する曲げ角度を算出する。時刻歴応答解析結果から回転がいし頂部が最大変位したときの角度を、がいし基部金具の最大応力が発生する曲げ角度として算出する(図3)。

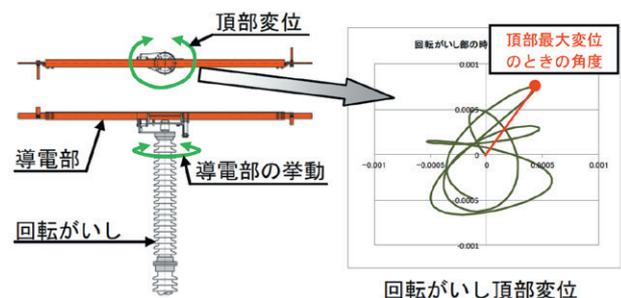


図3 回転がいし頂部の時刻歴変位

(3) 解析手順③ 応力集中で発生する応力の算出

がいし基部金具部だけの三次元ソリッドモデルを作成し、回転がいし頂部で最大変位が発生したときの傾き角度と同じ角度を曲げ角度として、静的解析で単位曲げモーメント 1 N・m あたりの発生応力を算出する (図 4)。三次元ソリッドモデルで静的解析するため、金具の形状・材質によつての応力分布が表現でき、応力集中箇所の最大発生応力が評価できる。

図 4 に三次元ソリッドモデルによる応力分布を示すが、応力集中箇所と図 1 の破損箇所が概ね同じであり、解析の妥当性が確認できる。

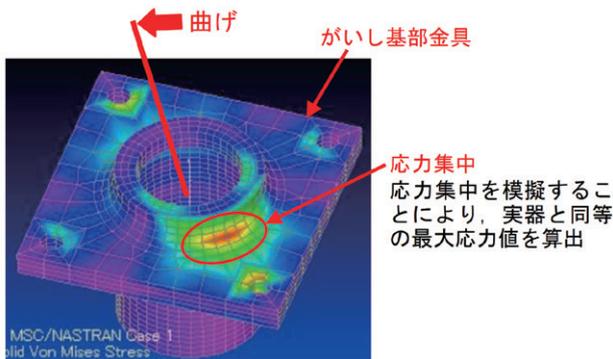


図 4 三次元ソリッドモデルの応力分布

2.3 最大発生応力の算出と実加振試験による検証

動的解析で得られた曲げモーメントと静的解析で得られた応力集中箇所の発生応力を掛け合わせて、がいし基部金具の最大発生応力を算出する。

JEAG5003 に基づく水平加速度 3 m/s<sup>2</sup> 共振正弦 3 波で加振した場合の、がいし金具の最大発生応力について、この最新の手法による解析結果と実加振試験結果を比較したところ、ほぼ一致した (表 1)。解析の妥当性が検証できたと言える。なお、解析値は実加振試験の機器条件、および入力波形条件をまったく同じにした解析モデルで算出した。

表 1 解析結果と実加振試験結果 (3 m/s<sup>2</sup> 共振正弦 3 波)

	がいし基部金具 最大発生応力	機器 固有振動数
最新手法による解析	228 N/mm <sup>2</sup>	3.1 Hz
実加振試験	229 N/mm <sup>2</sup>	3.0 Hz

2.4 解析手法のフローチャート

先に述べた、最新の解析手法をフローチャート化したものを図 5 に示す。

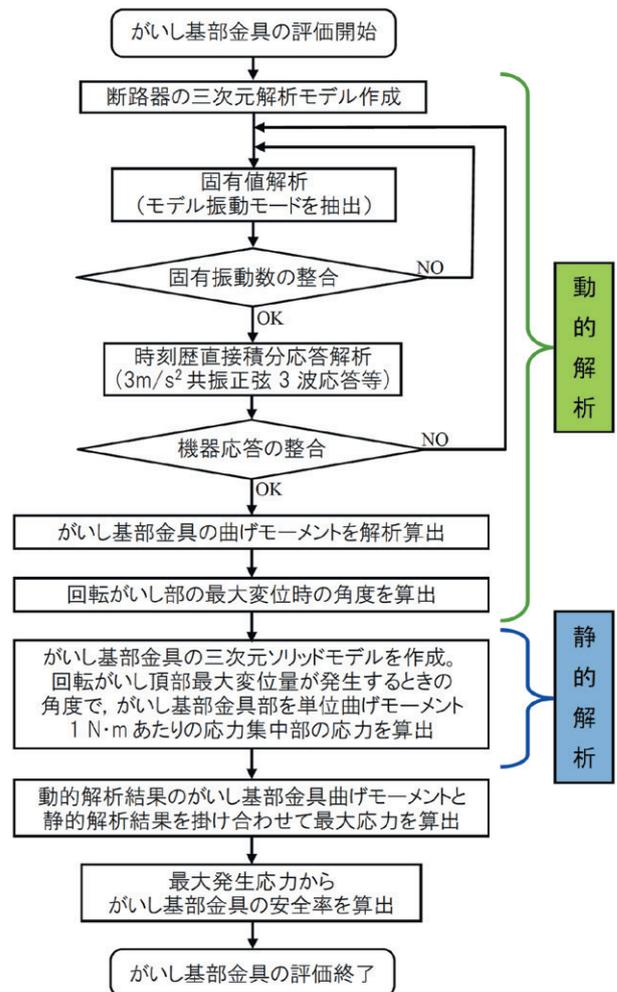


図 5 解析手法のフローチャート

2.5 想定地震動波形での解析結果の検証

この解析手法を用いて、東北地方太平洋沖地震により、がいし基部金具に被害を受けた機器の当該地点で想定された地震波形を解析モデルに入力して耐震評価を実施した。被害機器の台数と発生応力に対するがいし基部金具の安全率を表 2 に示す。

表 2 実器被害と耐震解析結果

機器定格	当該地点 被害数	がいし基部金具 安全率
電圧 72 kV 電流 1,200 A/2,000 A	12 個 (4 台 × 3 相)	0.9

解析結果は安全率 1 を若干下回っており、被害実態とおおむね合う解析結果が得られた。想定地震動波形に対する耐震評価が十分可能であると言える。

これは、動的解析により地震動が入力されたときの機器全体の応答が模擬できたことと、がいし基部金具部を三次元ソリッドモデルで静的解析することで応力集中が模擬でき、金具破損の起点が算出できたことから、より実態の現象に近づいたと言える。

### 3 非線形解析の取組み

#### 3.1 機器の被害状況

東北地方太平洋沖地震により、水平中心一点切形 550 kV 気中断路器で中間部にピンジョイント（以下、PJ）の付いた操作がいしのみが破壊した機器があった。被害写真を図 6 に示す。

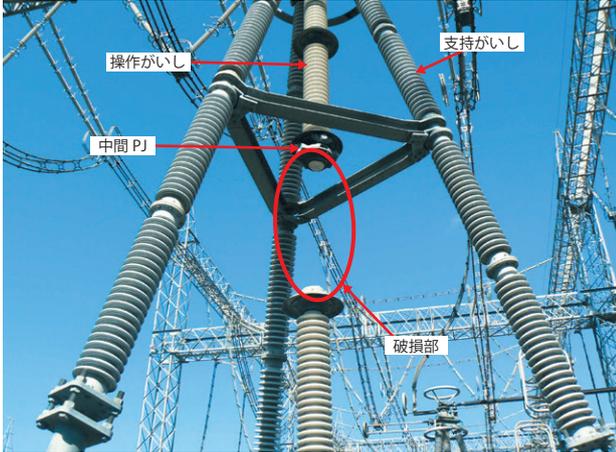


図 6 中間 PJ 付き操作がいしの被害器

#### 3.2 破損原因の追究

中間 PJ 付き操作がいしの破損原因を追究するため、操作がいし単独の縮小モデルを製作した。縮小モデルは、操作がいしの上端、中間、下端は PJ で構成される（図 7）。PJ が理想的に働くならば、がいしには曲げひずみがいっさい発生しないが、PJ 部の可動範囲を超えるような大きな揺れが発生するとカップリング間が接触し、がいしに曲げひずみが発生することとなる。

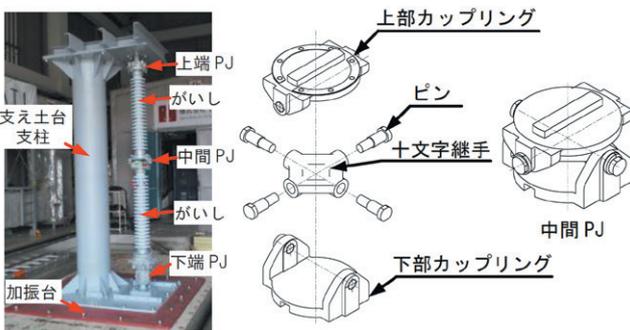


図 7 操作がいし縮小モデルの構造

#### 3.3 破損原因の検証破壊試験

縮小モデルでの、共振正弦 10 波（入力周期 0.7 Hz）、および東北地方太平洋沖地震において宮城県築館で観測された実地震波による試験結果を図 8、図 9 に示す。

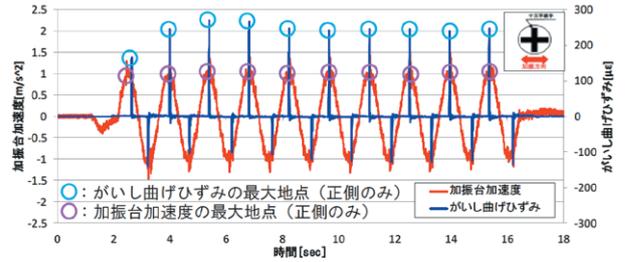


図 8 共振正弦 10 波 水平加速度 1 m/s<sup>2</sup> 試験結果

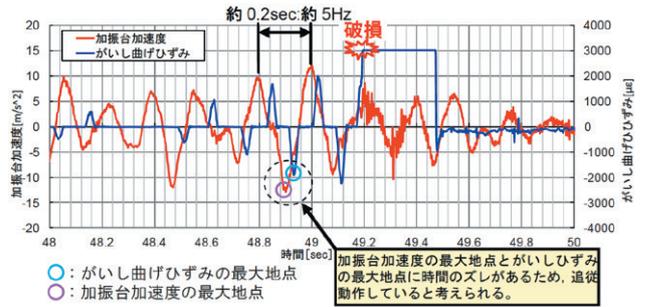


図 9 築館地震 試験結果

図 8 から、共振正弦波を 10 波（赤色）印加しているが、がいし曲げひずみ（図中○）がほぼ一定であることから、上下カップリング間の接触により、共振現象が途中で遮断されて振動特性が変化し非線形現象となっているため、曲げひずみが共振応答のように増加していない。

一方、宮城県築館で観測された地震波を印加した試験（図 9）では、がいしが破損した。加振台加速度が大きくなると、がいし曲げひずみが大きくなる傾向が図 9 から確認できる。このときの周期がおよそ 0.2 sec（およそ 5 Hz）であり、操作がいしの共振帯の波形ではないことがわかる。これは、操作がいし装置は、上端、中間、下端ともにピン構造で、外力に対して敏感に応答する構造体であるため、固有振動数でない振動でも供試器自体が揺れれば、その揺れに少し遅れて中間 PJ 部が追従動作し、上下カップリング間の接触が発生する。さらに大きな揺れになると、衝撃力となりがいし部に伝播して、がいしが破壊することが判明した。操作がいし部の追従動作の簡易説明を図 10 に示す。

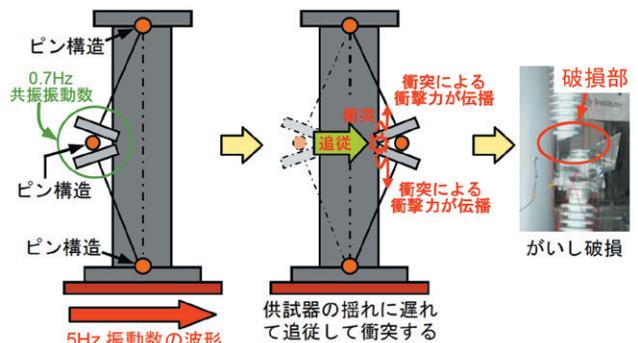


図 10 追従動作の簡易説明

### 3.4 非線形解析モデルの作成

解析には、MSC.NASTRAN（非線形解析オプション）を使用する。供試器を有限要素法による非線形過渡応答解析で模擬する際の解析モデルを図 11 に示す。支え土台の支柱とがいしは梁で作成し、上端 PJ と下端 PJ の境界条件を図に示すように設定した。中間 PJ 部は、非線形要素を用いて上下カップリング間の上側（赤要素）と下側（青要素）間に接触定義がしてある。その接触定義により、カップリング間の接触、および衝突による衝撃が表現できる。

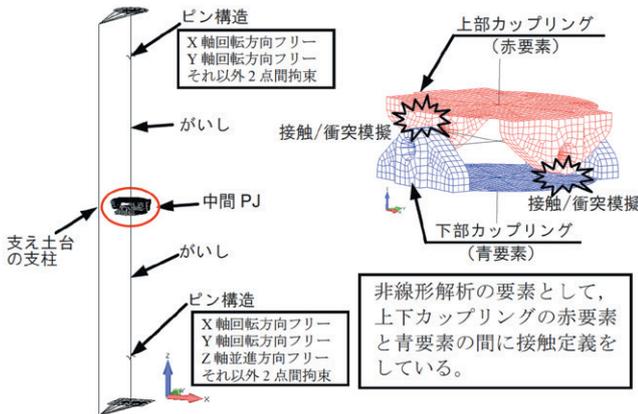


図 11 非線形解析モデルの説明

### 3.5 実加振試験結果と解析計算結果の比較

実加振試験結果、線形解析結果、衝撃を模擬した非線形解析結果を比較したグラフを図 12 に示す。

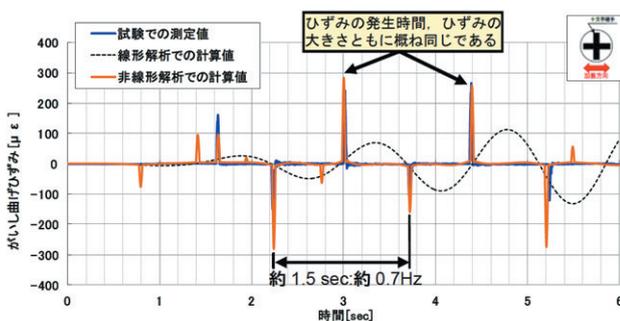


図 12 実加振試験結果と解析計算結果の比較

図 12 は、入力加速度  $1 \text{ m/s}^2$  の共振正弦 3 波とし、がいし最弱点部のひずみを比較したものである。青色が実加振試験結果であり、黒色点線が線形解析結果、橙色が非線形解析結果である。実加振試験結果と線形解析結果の比較をすると、線形解析ではカップリング間の接触、および衝突が模擬できないため、ひずみ波形の衝撃力が計算されない波形になってしまう。

これに対し橙色の非線形解析結果では、実加振試験結果と同等な衝撃力が計算されている。これは、カップリング間の接触、および衝突が模擬でき、衝撃ひずみが計算されているためである。がいし曲げひずみの発生

のタイミング、大きさのオーダー、および衝突時間は実加振結果とほぼ一致している。

このことから非線形解析を用いて耐震解析すれば、衝撃力の表現が可能になるため、実器の中間 PJ の動きについておおむね模擬できると言える。

今後は適宜、非線形解析を活用し、機器の非線形現象を考慮した耐震解析評価を実施し、さらなる製品の耐震性能向上を目指していく。

## 4 おわりに

現在までに多くの耐震解析評価を実施してきたなかで、実器振動を再現する精緻な解析モデルが作成でき、耐震解析の精度も向上してきている。

最近では、衝撃力のような非線形現象を解明するため、非線形過渡応答解析により、実器挙動を模擬した解析が可能であることを示した。

今後は、これらの解析技術を耐震性能向上品の開発に活用していきたい。

本稿の詳細は参考文献 (2)、(3) を参照されたい。

### ■参考文献

- (1) 一般社団法人日本電気協会日本電気技術規格委員会：「変電所等における電気設備の耐震設計指針」, JEAG5003-2010
- (2) 大山友幸他：「単柱構造断路器における基部金具の耐震解析技術の構築」, 電気学会論文誌 B, Vol.135, No.12, pp.737-742
- (3) 神田一彦他：「ユニバーサルジョイント付き操作がいしの非線形振動特性と解析技術」, 電気学会論文誌 B, Vol.135, No.12, pp.724-730



#### 大山 友幸

電力プラント事業本部  
断路器製造部 設計グループ 所属  
気中断路器の設計および開発業務に従事  
電気学会会員



#### 神田 一彦

技術開発本部  
技術研究所 解析・試験技術グループ 所属  
製品の解析技術開発に従事  
電気学会会員



#### 永田 清志

電力プラント事業本部  
断路器製造部 設計グループ 所属  
気中断路器の設計および開発業務に従事  
電気学会会員