

(214) 碍管付き起動変圧器の免震応答性能

(株) CRC総合研究所 ○亀岡 裕行
日本原子力研究所 正員 蛭沢 勝三
鳥羽商船高専 宇賀 丈雄

1. はじめに

免震技術の原子力機器への応用が検討されている¹⁾。機器免震の応用として、原子力機器のうちで安全上重要な機器を免震構造化した場合の有効性を確率論的手法を用いて評価する手法と評価用コードの開発が行なわれている²⁾。この手法は、機器に免震装置を取付けた免震構造系と取付けない非免震構造系それぞれの損傷頻度の違いから有効性を評価するものである。それぞれの損傷頻度は、構造系の応答がその機能喪失の限界を越えた時の条件付き確率として計算された損傷確率と地震動の発生頻度から求められる。機器免震の有効性の評価に関する研究の一環として、免震構造系の応答性能(免震応答性能)が変わることによって機器免震の有効性がどの程度変わり得るかをみるために、免震応答性能に影響を及ぼす要因を同定し、その影響の程度を評価している。

本報では碍管付き起動変圧器と免震装置とからなる免震構造系を対象として、免震装置・入力地震動・使用状況に係わる要因の設定条件を変えた場合の応答値を用いて免震応答性能を評価した結果について述べる。免震応答性能の機器免震の有効性へ及ぼす影響の評価結果については、本発表会での他の報告で行われる³⁾。

2. 評価の対象及び免震応答性能の評価項目

2. 1 評価の対象

(1) 対象要因 免震構造系の応答に影響を及ぼす主な要因として、免震装置のタイプ、同一タイプでの力学特性、入力地震動の周波数特性及び設置場所での使用温度等の違いが考えられるが、これらのうち力学特性を除いた要因を評価の対象とした。各要因の設定内容について述べる。(a) 免震装置：建屋免震に実用化されている高減衰積層ゴム免震装置(目標固有周期約1秒)²⁾と、建築建屋の床免震へ実用化されているベアリング支承コイルバネ粘性ダンパ(以下ベアリング支承という)免震装置(目標固有周期約3秒)⁴⁾を対象とした。後者の免震装置は、ベアリング支承部、コイルバネ部及び粘性ダンパ部から構成されている。

(b) 入力地震動：周波数特性の異なる3つの地震動(S_1N , S_1F , S_2F)を対象とした。それらのトリバタイトを図-1に示す。各地震動の卓越周期は S_1N 波(最大加速度 $\alpha_{max} = 267Gal$)で0.11~0.26秒、 S_1F 波($\alpha_{max} = 287Gal$)で0.17~0.32秒、 S_2F 波($\alpha_{max} = 407Gal$)で0.12~0.32秒であり、 S_1F 及び S_2F は S_1N 波に比べやや長い周期成分が比較的卓越している。(c) 使用温度：対象変圧器の設置地域の月別平均気温の最高気温30℃、平均気温13.5℃及び最低気温-3℃を対象とした。

(2) 対象機器 原子力発電所を対象とした過去の地震PSA(Probabilistic Safety Assessment)⁵⁾で、安全上重要な機器として挙げられているものの1つに275kV 3相交流の碍管付き起動変圧器があり、これを評価の対象とした。この変圧器は、電気絶縁油が封入されている碍管(重量約2ton、設計減衰定数5%)、変圧器本体及び基礎から構成されており、碍管と変圧器本体は、ポケットを介しスリーブ

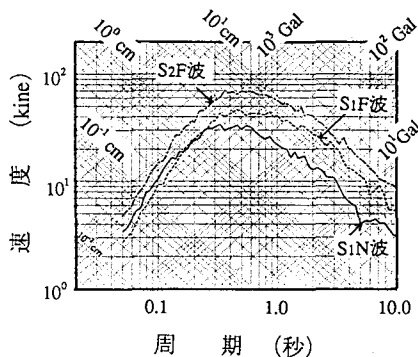


図-1 入力地震動のトリバタイト

部で接合されている。碍管と変圧器本体の総重量は約80tonである。高減衰積層ゴム免震装置は、変圧器本体と基礎の間の4すみに設置されているベダスタル上にセットされるように設計がなされた²⁾。ベアリング支承免震装置は、高減衰積層ゴムと同じ設置条件の基に、支承部はベダスタル上に、コイルバネ部及び粘性ダンパ部は4つのベダスタルを除いた空間にセットされるように設計がなされた⁴⁾。碍管付き起動変圧器と免震装置からなる免震構造系の構造を図-2に示す。

2.2 免震応答性能の評価項目

免震応答性能の評価項目について述べる。(i) 免震構造系のうち碍管付き起動変圧器の機能喪失の損傷モードは碍管内部の電気絶縁油の漏洩であり、その限界値はスリーブ部での碍管の口開き現象を発生させる最大加速度である²⁾。そこで、碍管部の加速度応答に着目して、2.1節の評価要因の設定条件を変えた場合の免震応答性能に及ぼす影響の程度を評価した。(ii) 免震構造化した場合にどの程度応答が低減されるかを見るために、免震装置の無い場合と有る場合での加速度応答を比較した。

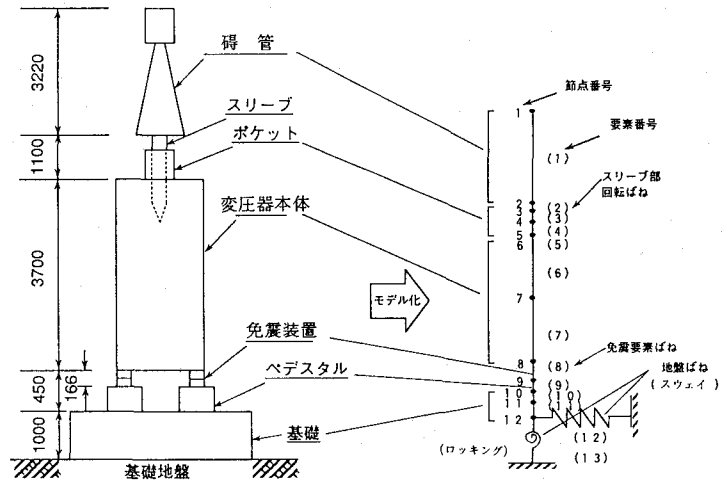


図-2 碍管付き起動変圧器の免震構造系の構造

3. 応答解析の条件及び結果

3.1 応答解析の条件

(1) 応答解析法 変圧器の応答は振動モデルを作成し平衡方程式から動的応答解析によって求められた。

$$[M] \{\ddot{U}\} + [C] \{\dot{U}\} + [K] \{U\} = -[M] \{I\} \{\ddot{\alpha}\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで[M],[C]及び[K]は質量、ひずみエネルギー比例型の減衰及び剛性マトリックスを、 $\{\ddot{U}\}$ 、 $\{\dot{U}\}$ 及び $\{U\}$ は加速度、速度及び変位ベクトルを表す。また、 $\{I\}$ は水平方向の自由度が1で他の自由度が0のベクトルを、 $\{\ddot{\alpha}\}$ は入力地震動を表す。非免震の場合には(1)式を線形平衡方程式として解析を行うが、免震の場合には[K]或いは[K]を時々変化させる非線形方程式として解析を行った。

(2) 振動モデル 免震構造系は、図-2に示す多質点系振動モデルでモデル化された。図において、碍管、ポケット、変圧器本体及び基礎は曲げせん断梁要素で、スリーブは回転ばね要素で、地盤は水平ばね及び回転ばね要素でモデル化した。以下に、免震装置のモデル化の内容について述べる。

(a) 高減衰積層ゴム免震装置：この免震装置は、図-3に示すせん断力-せん断ひずみ関係に従う非線形ばね要素でモデル化された。等価ばね定数 K_0 (kgf/cm) はひずみ依存性Bi-linear型に従うとし次式で求められた。

$$K_0 = G_0 \cdot A / H \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで G_0 は等価せん断弾性係数(kgf/cm²)、Aはゴムの断面積(cm²)、Hはゴム高さ(cm)を表す。

(b) ベアリング支承免震装置：この免震装置は、図-4に示す非線形弾性型のばね要素と、相対速度依存型

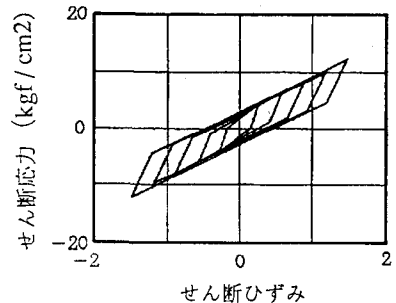


図-3 高減衰積層ゴム免震装置のせん断応力-せん断ひずみの関係

の非線形ダンパ要素によりモデル化された。その減衰係数C (kgf・sec/cm)は次式で求められた。

$$C = F_R / v = \{0.42 \exp(-0.043 t) \cdot S (v / d)^{0.59} / v \dots (3)$$

ここで F_R は粘性せん断抵抗力(kgf)、 v は相対速度(cm/sec)、 t は温度(°C)、 S は抵抗板面積(cm²)、 d は抵抗板と底板とのせん断すき間(cm)を表す。

3.2 応答解析の結果

動的応答解析によって得られた碍管部での加速度応答値を表-1に、変圧器本体部での変位応答値を表-2に示す。

4. 免震装置の性能評価

(1) 免震装置のタイプの影響 最初に、免震装置のタイプの違いによる加速度応答スペクトルへ及ぼす影響について、非免震及び免震構造系それぞれのスペクトルを比較することによって評価する。非免震構造系の場合には碍管部と変圧器本体部との質量が大きく異なること、碍管部での固有周期(約0.13秒)と変圧器本体部での固有周期(約0.01秒)とが離れていることから、変圧器本体部での加速度応答スペクトルを用いて、応答の周波数特性をみることができると共に、碍管部での加速度応答値も推定できる。一方、免震構造系の場合には免震装置が非線形特性を有することから、変圧器本体部での加速度応答スペクトルから碍管部での加速度応答値を厳密には推定できないものの、免震装置の特性(フィルター)による応答の増幅特性については推定できる。

S_1N 波に対する変圧器本体部での非免震、高減衰積層ゴム免震及びベアリング支承受免震($t=13.5$ °C)それぞれ毎の加速度応答スペクトルを図-5に示す。図から非免震構造系のスペクトルは、碍管部の固有周期を表す約0.13秒前後の成分が卓越している。この周期での加速度応答スペクトルは約850Galであり、表-1に示す加速度応答値と良く一致している。これに対し、免震構造系のうち高減衰積層ゴム免震でのスペクトルは、約0.8秒の高減衰積層ゴム免震のフィルターを通った結果として、碍管部の固有周期が含まれている短周期帯の成分が小さくなった半面、約0.8秒の周期帯の成分が卓越している。同様にベアリング支承受免震では、約1.5秒の周期帯の成分が卓越している。このような傾向は、 S_1F 及び S_2F 波でも同様であった。

免震装置のタイプの違いによる応答倍率(碍管部での加速度応答値と入力地震動の最大加速度との比)へ及ぼす影響について評価する。表-1の加速度応答の結果を用いて応答倍率を計算すると、高減衰積層ゴム免震の場合には S_1N 波では約1/2.3、 S_1F 波では約1/1.5、 S_2F 波では約1/1.8であり、平均の応答倍率は約1/2.0であった。同様に、ベアリング支承受免震($t=13.5$ °C)の平均応答倍率は約1/7.0、非免震の平均応答倍率は約3.0であった。これらの平均応答倍率から判断すると、ベアリング支承受免震の応答性能は高減衰積層ゴム免震に比べ約3倍高い。次いで、免震構造化した場合としない場合での応答の低減効果を免震応答と非免震応答と

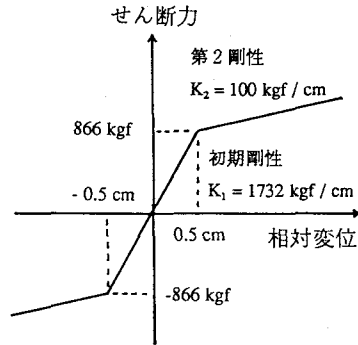


図4 ベアリング支承受免震装置の非線形弾性ばね要素のせん断力-相対変位の関係

表-1 碍管部での加速度応答値の計算結果

入力 地震動	免震装置 無し	免震装置有り			
		高減衰 積層ゴム	ベアリング支承受		
			-3°C	13.5°C	30°C
$S_1N(267Gal)$	865	115	68	36	30
$S_1F(287Gal)$	755	185	78	49	40
$S_2F(407Gal)$	1239	221	108	61	42

単位(Gal)

表-2 変圧器本体部での変位応答値の計算結果

入力 地震動	免震装置 無し	免震装置有り			
		高減衰 積層ゴム	ベアリング支承受		
			-3°C	13.5°C	30°C
$S_1N(267Gal)$	0.01	2.0	1.5	2.4	3.1
$S_1F(287Gal)$	0.01	4.8	2.9	4.6	7.1
$S_2F(407Gal)$	0.02	6.3	4.1	5.1	7.7

単位(cm)

の比を用いて評価したところ、高減衰積層ゴム免震の場合には約1/6.0程度低減されるのに対し、ベアリング支承免震では約1/21程度低減され、後者の方の低減効果が非常に大きい。

免震装置のタイプの違いによる変位応答へ及ぼす影響について、加速度応答と変位応答それぞれの増減の関係の観点から、 S_1F 波に対する応答値を用いて評価する。免震構造系での加速度応答と変位応答の関係は、通常、加速度応答が減少すれば変位応答が増加するものである。この関係について最初に、高減衰積層ゴム免震と加速度応答の低減効果の低い使用温度 $-3^{\circ}C$ でのベアリング支承免震を対象として評価する。高減衰積層ゴム免震に対し、ベアリング支承免震の加速度応答値は約1/2に減少しているが、同様に変位応答値も約1/2に減少している。また、使用温度 $13.5^{\circ}C$ でのベアリング支承免震と比較すると、加速度応答値は約1/4と更に小さくなるが、変位応答はほぼ同程度となっている。使用温度 $30^{\circ}C$ の場合では通常の傾向を示している。このような傾向は、 S_1N 及び S_2F 波でも同様であった。今回の条件下では、免震構造系の加速度応答の減少が変位応答の増加に繋がるという傾向にはなっていない。

(2) 入力地震動の周波数特性の影響 入力地震動の周波数特性の違いの免震応答性能へ及ぼす影響について、高減衰積層ゴム免震を対象とした上述の応答倍率を用いて評価する。応答倍率は S_1F 波(約1/1.5) < S_2F 波(約1/1.8) < S_1N 波(約1/2.3)の順番に大きい。この順番はやや長周期成分の比較的卓越している S_1F 及び S_2F 波が、短周期成分の比較的卓越している S_1N 波より小さいというそれぞれの入力地震動の周波数特性を反映している。また、3つの地震動の違いによって応答倍率は約1.5倍程度違う。このような傾向は、ベアリング支承免震でも同様であった。約1秒以上に固有周期を設定する免震構造の応答を低減させる効果としては、短周期成分の卓越した地震動に対して有効であるが、やや長周期成分の卓越した地震動に対しての有効性は小さい。このように入力地震動の周波数特性によって応答性能が異なる。

(3) 使用温度の影響 (1)式に示すようにベアリング支承免震の減衰効果は温度に依存するので、この免震を対象として、使用温度を変えた場合の応答性能について評価する。表-1及び2から使用温度が高い程加速度応答は小さいもの、変位応答は逆に大きくなる傾向がある。これは、相対速度に対する粘性せん断抵抗力が使用温度が高いと小さくなり、ベアリング支承免震のフィルターが長周期側に移るためである。また、使用温度の違いによる加速度応答値は約2倍程度違う。このように使用温度の違いによって応答性能が異なる。

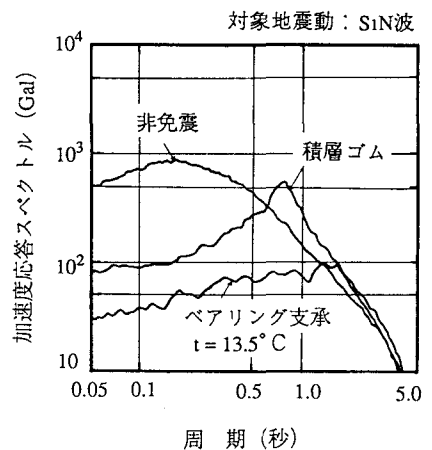


図-5 変圧器本体部での加速度応答スペクトル

5. おわりに

今回の評価条件の基で得られた結果について述べる。碍管付き起動変圧器と免震装置からなる免震構造系を対象として、免震装置・入力地震動・使用温度に係わる要因の設定条件を変えた場合の応答値を用いて免震応答性能を評価したところ、その性能は免震装置の違いでは約3倍程度、入力地震動の違いでは約1.5倍程度及び使用温度の違いでは約2倍程度異なることが明らかになった。

参考文献

- (1) 藤田隆史：原子力施設における免震構造、原子力工業、第34巻、第12号、1988年。
- (2) K.Ebisawa and T.Uga：Evaluation Methodology for Seismic Base Isolation of Nuclear Equipments, Nuclear Engineering and Design (掲載予定)。
- (3) 蛭沢勝三ほか：機器免震有効性評価法の碍管付き起動変圧器への応用、第22回地震工学研究発表会、No47、1993年。
- (4) 竹ノ内勇ほか：ベアリング支承コイルバネ粘性ダンパー免震装置の碍管付き起動変圧器への応用、第22回地震工学研究発表会、No 48、1993年。
- (5) United States Nuclear Regulatory Commission：NUREG-1150,1989。