

(215) ベアリング支承コイルバネ粘性ダンパ免震装置の 碍管付き起動変圧器への応用

オイレス工業 (株)

○竹ノ内 勇

加地 孝敏

日本原子力研究所

正員 蛭沢 勝三

1. はじめに

建築建屋を対象とした免震構造化の主方式として、基礎免震では積層ゴム方式、床免震ではベアリング支承コイルバネ粘性ダンパ方式（以下ベアリング支承と記す）がすでに実用化されている¹⁾。また現在、原子力施設等における機器を対象とした機器免震についてもこれらの免震技術の応用が検討されている²⁾。これに関連して、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適用性と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われている³⁾。この研究の一環として、機器免震の有効性の評価法を用いて、種々提案されている免震装置を安全上重要な機器へ適用した場合のそれぞれの有効性の評価が行われている。

本報では、種々の免震装置のうち特にベアリング支承免震装置を対象とした場合の有効性を評価するために、それを機器免震へ応用する場合の設計の考え方をまとめると共に、この考え方を碍管付き起動変圧器に適用して免震構造設計を行った結果について述べる。更に、碍管付き起動変圧器とベアリング支承免震装置とからなる免震構造系の損傷確率の評価に必要な免震構造系の機能喪失の限界値の評価結果についても述べる。この機能喪失限界値を用いて評価したベアリング支承免震の有効性の結果については、本発表会での他の報告で行われる⁴⁾。

2. ベアリング支承免震装置の概要

ベアリング支承免震装置は機能上、上部構造物を地震動から絶縁する「絶縁方式」に分類される。この免震装置は、図-1に示す支承部、バネ部及びダンパ部の3要素からなる。支承部は、多数のベアリングボールによって上部構造物の自重を支えると共に、ころがり運動により上部構造物を水平地震動から絶縁する。バネ部は、基礎から絶縁された上部構造物に復元力を与えると共に、上部構造物と免震装置からなる免震構造系の固有周期を長周期側に設定することにより地震動による加速度応答を低減する。ダンパ部は、粘性体のせん断抵抗力を利用して地震動のエネルギーを吸収し、地震動による変位応答を制限する。

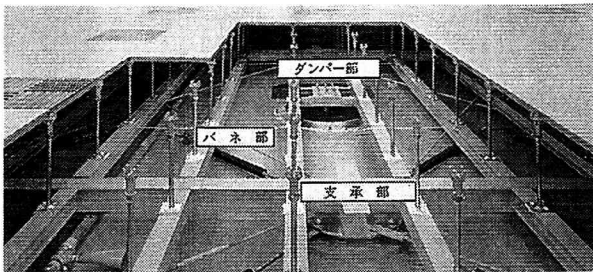


図-1 ベアリング支承コイルバネ粘性ダンパ免震装置の構成

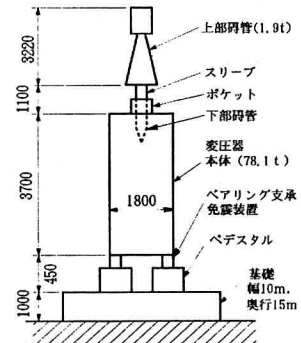


図-2 碍管付き起動変圧器の免震構造

3. ベアリング支承免震装置による機器免震構造設計の考え方及び免震構造の設計結果

3.1 対象機器及び設計条件

(1) 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275kV3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、図-2に示すように電気絶縁油が封入されている碍管、変圧器本体及び基礎から構成されており、碍管と変圧器本体の総重量は約80tonである。

(2) 設計条件 主な設計条件は次の通りである。a)免震装置の設置場所は基礎と変圧器本体の間とし、その設置空間は一辺が変圧器幅の2倍程度の正方形空間とし、免震装置の高さはメンテナンスを考慮できるように可能な限り低くする。b)変圧器の高さと免震装置の設置空間幅の関係は、変圧器本体の浮き上がり等を考慮して定める。c)免震構造系と隣接構造物との接触防止のための空間は、数10cm程度とする。d)設計時の応答を確認するために使用する入力地震動は、原子力発電所の耐震設計で用いられている地震動レベル程度のもので、やや長周期成分の卓越した周波数特性を有するものを含む複数のものとする。

3.2 設計手順の考え方

ベアリング支承免震装置を用いた場合の機器免震の設計手順の考え方は、このタイプによる床免震用の設計手順を応用してまとめられた。その考え方を図-3に示す。図中(6)の詳細設計の主要部を構成するベアリング支承部、コイルバネ部及びダンパ部の設計方法について述べる。機器免震では床免震に比べ免震装置の設置空間が狭いので、設置基数を制限し個々の免震装置の負荷容量を上げねばならないことに留意する必要がある。

(1) ベアリング支承部 ベアリング支承部での主な設計項目には、支承の基数、ベアリングの径と個数の設定がある。免震装置の設置空間からベアリング支承を4基設置するものとするれば、支承1基当たりの受ける荷重は20tとなる。この荷重を受けるボールベアリングは、JIS B1501に規定される玉軸受用鋼球を用いるものとする。その径と個数は、球と平面の接触に関する(1)式のヘルツの公式によって求められる最大支圧応力 σ_{max} (kg/cm²)が鋼球と接触する支圧板及び鋼球それぞれの許容応力内に収まるように定められる。

$$\sigma_{max} = \left[\frac{P_B}{17.1 \times (r/E)^2} \right]^{1/3} \quad (1)$$

P_B はボール1個当たり鉛直荷重 (kg)、 r はボール半径(cm)、 E はボールのヤング率 (kg/cm²)を表わす。
 (2) コイルバネ部 コイルバネ部での主な設計項目には、バネの本数、バネ定数及び微震動に対する免震構造系の反応を防止するための予張力(トリガ荷重)の設定がある。バネの本数は、ダンパ1基当たり4本とするとダンパ4基では16本となる。バネ定数 K は、コイルバネ免震構造系設計の基本となる固有周期 T と被免震機器の重量 M から免震構造系の等価バネ定数として求められる。固有周期 T は、床免震を

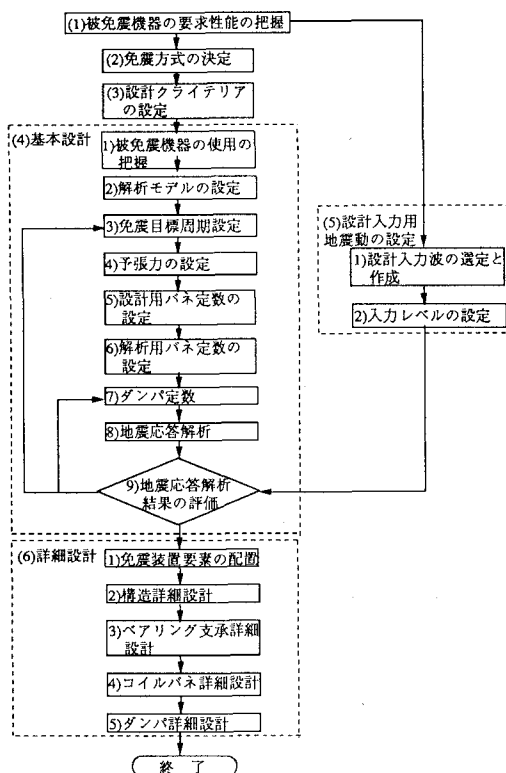


図-3 ベアリング支承免震装置による機器免震構造の設計手順の考え方

対象とした場合には通常2～4秒の間に設定される。そこで、機器免震ではこの範囲での値を初期条件として与え、応答解析の結果に基づいて再設定し、再解析を繰り返すことによりTの確定値を求める。

$$K = M \cdot (2\pi / T)^2 \quad (2)$$

また、予張力 Q_T をもたらす予張力バネのバネ定数 K' は、周期Tでの変形量 δ を定めることによってKから求められる。通常床免震の設計では Q_T は10Gal、 δ は5cmとしているのでここでもこれらの値を採用した。

$$K' = (K \cdot \delta - Q_T) / \delta \quad (3)$$

(3) ダンパ部　ダンパ部での主な設計項目には、ダンパの種類及びせん断抵抗力の設定がある。ダンパの種類は粘性ダンパとした。粘性ダンパの粘性せん断抵抗力 F_R (kg) は、粘性体のせん断速度に比例して抵抗力を発生する (4) 式に示す速度比例型減衰要素を対象とした。

$$F_p = Ae^{Bt}S(V/d)^c \quad (4)$$

ここで t は温度(°C)、 S は抵抗板面積(cm^2)、 V はせん断速度(cm/sec)、 d は抵抗板と底板とのせん断すき間(cm)、A,B,Cは粘性体の種類によって定まる係数を表わす。 S 及び d はバネの設定と同様に、ある初期値を与え応答解析結果に基づく再設定、再解析を繰り返すことにより求められる。

3. 3 免震構造の設計結果

(1) 設計用応答解析結果　3.2節の手順の考え方にに基づき行った免震構造の設計結果を用いて、応答解析した結果について述べる。碍管付き変圧器の重量の殆どは変圧器本体部分に集中しているため、1質点モデルで近似して設計応答解析を行った。解析に当たっては、粘性ダンパの抵抗力は温度依存性があるので、対象変圧器の設置地域の年間月別平均気温を参考として30°C及び-5°Cの両ケースを対象とした。その解析モデルを図-4に、解析結果を表-1に示す。

(2) ベアリング支承免震装置の仕様　上述の解析結果に基づいて、3.1節の設計条件を満たすように設計した仕様について述べる。ベアリング支承免震装置の配置図を図-5に、ベアリング支承部、コイルバネ部及びダンパ部それぞれの主な仕様を表-2に示す。

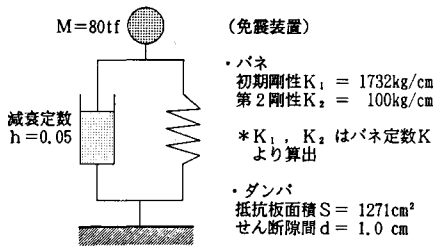


図-4 解析モデル

表-1 解析結果

入力波	温度(°C)	最大応答変位(mm)	最大応答速度(kine)	最大応答加速度(Gal)
SIN (267Gal)	-5	13	17	52
	30	27	16	26
SIF (287Gal)	-5	27	22	62
	30	53	21	33

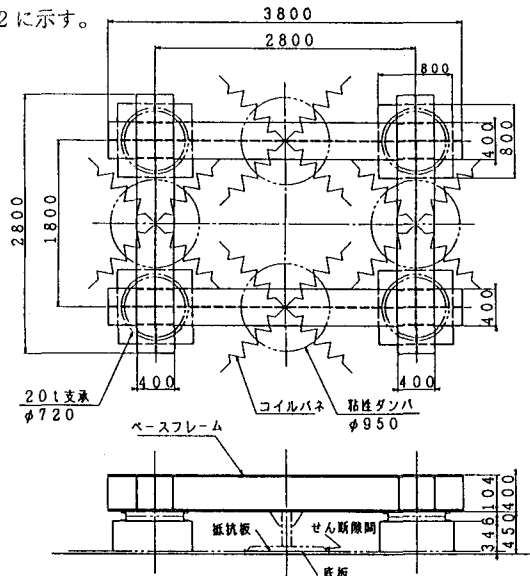


図-5 ベアリング支承免震装置の配置図

4. ベアリング支承免震装置からなる機器免震構造系の機能限界値の評価

3.3節で設計した免震構造系の機能喪失限界値を確率論的手法を用いて評価した。評価に伴う要因は全て対数正規分布に従う確率変数として取り扱うと共に、変圧器部と免震装置部それぞれの機能喪失限界値を比

較し、小さい方の値を免震構造系の限界値とした。変圧器部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上部碍管の口開き

表-2 ベアリング支承免震装置による免震構造の設計仕様

(支承部)			
支承基数	$n_s = 4$	負荷荷重	$P_s = 80/4 = 20t$
鋼球個数	$n_b = 61$	可能移動量	$\delta = 20cm$
(粘性ダンパ部)			
ダンパ基数	$n_D = 4$	抵抗板面積	$S_D = 1271/4 = 318cm^2$
せん断隙間	$d = 1cm$	ダンパ外径	$D_D = \phi 950mm$
(コイルバネ部)			
バネ個数	$n_b = 4 \text{ sets (16本)}$	バネ1本当りバネ定数	$k = 99.8/4 = 25.0kg/cm$
トリガ荷重	$P_T = 816/4 = 204kg$	トリガ量	$\delta_T = 204/25.0 = 8.2cm$
バネ線径	$d_b = 11mm$	コイル内径	$D_b = 55mm$
		バネ巻数	$N = 35.5 \text{ 巻}$
		バネ自由長	$L = 473mm$

現象を発生させる最大加速度であった。その中央値は約650Gal、対数標準偏差は0.1であった³⁾。免震装置部の損傷モードはコイルバネの破断や過大変位に伴う部材同士の衝突の発生によるもの等があったが、支配的なモードは床免震では無視できた変圧器の浮き上がりの発生によるベアリングの飛散であった。その発生する加速度限界値 α_{lim} は、変圧器本体部での地震動起因の慣性力（水平地震動 α_H と鉛直地震動 α_V による慣性力の和）によるモーメントと、変圧器の自重による浮き上がり時のモーメントとの釣り合い式から求められた。図-6にこれらの関係を示す。 α_H は免震装置による応答低減率（変圧器本体部での加速度応答と基礎下端での地震動の最大加速度との比） K_a に、 α_V は基礎下端での地震動の鉛直成分と水平成分との比 K_b に依存する。 K_a は入力地震動の周波数特性や使用温度状況によって異なるので、それらの設定条件を変えた場合での加速度応答値⁶⁾を用いて、その中央値 \bar{K}_a 及び対数標準偏差 β_a を求めたところ、 \bar{K}_a は約1/8、 β_a は約0.37であった。 K_b も地震動によって異なるので、観測地震動のデータ⁷⁾からその中央値 \bar{K}_b 及び対数標準偏差 β_b を求めたところ、 \bar{K}_b は約1/3、 β_b は約0.14であった。これらの値とモーメントの釣り合い式を用いて、1次近似2次モーメント法によってばらつきの伝播解析を行ったところ、 α_{lim} の中央値は約1440Gal、対数標準偏差は0.2であった。免震応答の低減率は \bar{K}_a でみると約1/8と非常に大きいので、碍管部が機能喪失する地震動に達する前に、免震装置自体が機能喪失するので、免震構造系の限界値は免震装置部での値となった。

浮き上がり発生の加速度限界値(α_{lim})の評価
 α_H と α_V に起因する慣性力によるモーメント = 自重による浮き上がり時のモーメント

5. おわりに

コイルバネ支承免震装置を用いた機器免震の設計手順の考え方をまとめると共に、これを用いて碍管付き起動変圧器にコイルバネ免震装置を取り付けた構造設計を行った。この免震構造系の機能喪失の限界値も評価した。

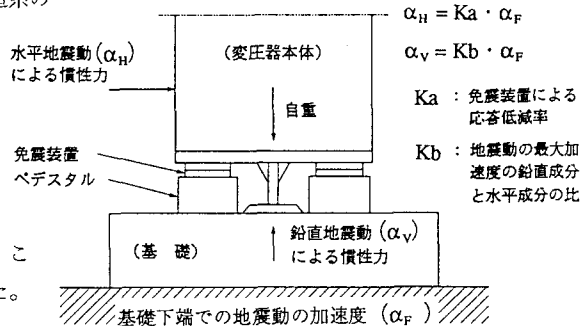


図-6 浮き上がり限界の評価

参考文献

- (1) 松田泰治ほか:免震構造に関する調査、電中研報告、385010、1985年。(2) 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。(3) K.Ebisawa et al.: Evaluation Methodology for Seismic Base Isolation of Nuclear Equipments, Nuclear Engineering and Design (記載予定) (4) 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、NO 47、1993年。(5) United States Nuclear Regulatory Commission: NUREG-1150、1989。(6) 亀岡裕行ほか:碍管付き起動変圧器の免震応答性能、第22回地震工学研究発表会、No 49、1993年。(7) 川島一彦ほか:最大地震動及び地震応答スペクトルの距離減衰式、土研所報告、第166号、1985年。