

(213) 機器免震有効性評価法の碍管付き起動変圧器への応用

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

原子力施設の建屋、建屋床及び機器への免震技術の応用が検討されている¹⁾。地震動による原子力発電所の炉心損傷の発生頻度を低減することを目的として、安全上重要で地震動抵抗力の小さく、耐震対策の難しい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及び評価用コードの開発を行っている。この研究の一環として、これまでに機器免震の有効性の評価法を提案する²⁾と共に、評価用コードE B I S A (Equipment Base Isolation System Analysis)の原型版を開発した。この手法を用いて、提案されている種々の免震装置を機器免震に応用した場合の有効性の程度や、これらの装置の対象機器への適用限界を検討している。

本報では、上述の評価法を用いて、原子力機器の中で安全上重要と考えられているものの1つである碍管付き起動変圧器を積層ゴムタイプ及びコイルパネタイプ免震装置で免震構造化した場合を対象として、それぞれの有効性を評価した結果について述べる。

2. 機器免震の有効性評価法の概念

著者等が提案している機器免震の有効性評価法²⁾の概念を図-1に示す。この手法は、免震構造化する必要があるかどうかの適用性を評価する絶対評価と、免震構造化した場合にどの程度有効かを評価する相対評価とからなる。絶対評価では、免震装置のない場合(非免震)での機器の耐用期間中の損傷確率(P_t)の大きさから適用性の評価を行う。この値が有意の場合には、免震構造化に関する技術的検討を行った上で免震設計を実施し、相対評価を行う。この評価では、非免震の場合と免震装置のある場合(免震)での損傷頻度(λ (回/年))の比の大きさから有効性の評価を行う。 P_t 及び λ の定量化に当っては、地震P S A (Probabilistic Safety Assessment)で用いられている確率論的手法³⁾を応用した。以下に、 P_t 及び λ の評価手法について述べる。

P_t は、機器の耐用期間(t 年)と λ を用いて次式で求まる。

$$P_t = 1 - \exp(-\lambda \cdot t) \quad (1)$$

λ は、地震動の超過発生頻度を表す地震危険度 $H(\alpha)$ ⁴⁾と機器の機能喪失を表す累積確率 $P(\alpha)$ から次式で求められる。 α は、任意の最大加速度(Gal)を表す。

$$\lambda = \int_0^{\infty} \left[\left[-\frac{dH(\alpha)}{d\alpha} \right] \cdot P(\alpha) \right] d\alpha \quad (2)$$

$P(\alpha)$ は、 α に対する機器の応答 $f(\alpha, x)$ と機器の機能喪失の限界値 $f(y)$ が互いに独立であると仮定した上で、応答が機能喪失限界値を上回った時の条件付き確率として次式で求められる。

$$P(\alpha) = \int_0^{\infty} \left[f(\alpha, x) \left\{ \int_0^x f(y) dy \right\} \right] dx \quad (3)$$

ここで $f(y)$ が対数正規分布に従うものと仮定され、 $f(y)$ は y を確率変数とする中央値(C_M)及び対数標準偏差(β_c)の確率密度関数として次式で表される。

$$f(y) = (1/\sqrt{2\pi}\beta_c) \cdot \exp \{ -[\ln y - \ln C_M]^2 / 2\beta_c^2 \} \quad (4)$$

確率論的応答評価では $f(\alpha, x)$ は設計応答ではなく、これの保守性を除いた現実的な応答として表される。現実的応答の評価手法としては、地震PSAで用いられているものの1つに「応答係数法」^{5),6)}がある。これは、設計用地震動の最大加速度(α^D)に対する設計応答値(q^D)とこれの保守性の度合いを係数の形で表した「応答係数(F_R)」^{5),6)}を用いて、現実的応答値 $f(\alpha, x)$ を次式のように求めるものである。

$$f(\alpha, x) = (q^D / F_R) \cdot (\alpha / \alpha^D) \quad (5)$$

ここで F_R は対数正規分布に従うと仮定され、中央値($\overline{F_R}$)及び対数標準偏差(β_R)の確率密度関数として表される。従って、 $f(x, \alpha)$ も対数正規分布に従う x を確率変数とする確率密度関数として、次式で表される。

$$f(\alpha, x) = (1/\sqrt{2\pi}\beta_R) \cdot \exp\{-[\ln x - \ln[(q^D/\overline{F_R}) \cdot (\alpha/\alpha^D)]]^2 / 2\beta_R^2\} \quad (6)$$

機器免震の有効性評価では、非免震・免震それぞれの場合での設計応答値($q^D_{without}$ 、 q^D_{with})を用いて、非免震での機器の損傷頻度 $\lambda_{without}$ と免震での損傷頻度 λ_{with} を求める。

3. 評価の対象及び条件

3.1 評価の対象

原子力発電所を対象とした過去の地震PSA⁷⁾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、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。対象とした免震装置は、建屋免震に実用化されている高減衰積層ゴムタイプ免震装置(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)⁸⁾である。この免震装置は、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。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免震設計がなされた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された⁸⁾。図-2にこれらのセット位置を示す。碍管付き起動変圧器に免震装置を取り付けた免震構造系が日本原子力研究所 東海研究所(原研東海)の敷地内に設置されていると仮定した。

3.2 評価の条件

- (1) 地震危険度 著者等が評価した原研東海サイト周辺の地震危険度⁴⁾を用いた。評価結果を図-3に示す。
- (2) 現実的応答値 非免震・免震それぞれでの多質点系振動モデルを作成し、これらのモデルと周波数特性の異なる3つの地震動を用いて、動的時刻歴応答解析によって各設計応答値(q^D)を求めた⁹⁾。そして、これらの q^D と著者等が評価した応答係数 ($\overline{F_R} = 1.21, \beta_R = 0.38$)⁵⁾を用いて、(6)式から非免震・免震それぞれ

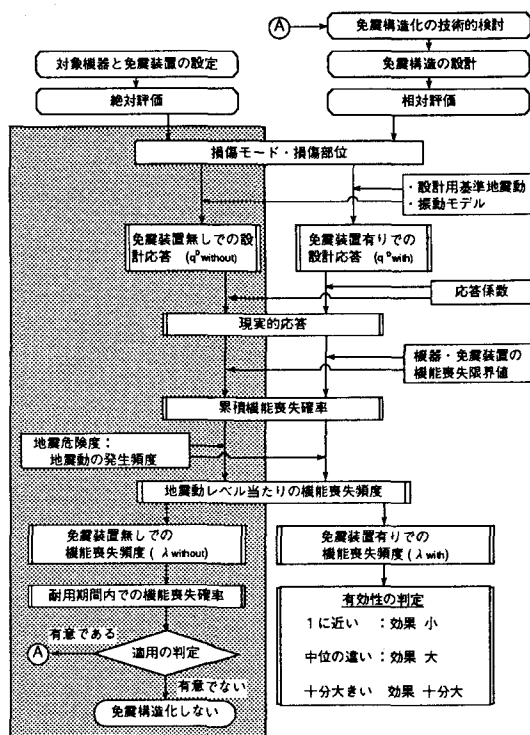


図-1 機器免震の有効性評価法のご概念

毎の現実的応答値を求めた。

(3) 機能喪失限界値 免震構造系の機能喪失限界値の評価では機器本体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。高減衰積層ゴム免震構造系の損傷モードは、機器本体では碍管内部の電気絶縁油の漏洩であり、免震装置では積層ゴムの剪断破断であった。評価の結果、後者より前者の方が小さく、この場合の限界値は上部及び下部碍管の接合部であるスリーブ部での上部碍管の口開き現象を発生させる最大加速度であり、その C_M は約650Gal、 β_c は0.1であった²⁾。ベアリング支承免震構造系の損傷モードは、機器本体では積層ゴムの場合と同様であり、免震装置ではベアリング支承部での変圧器本体の浮き上がりによるベアリングの飛散であった。評価の結果、前者より後者の方が小さくこの場合の限界値は C_M は約1440Gal、 β_c は0.2であった³⁾。

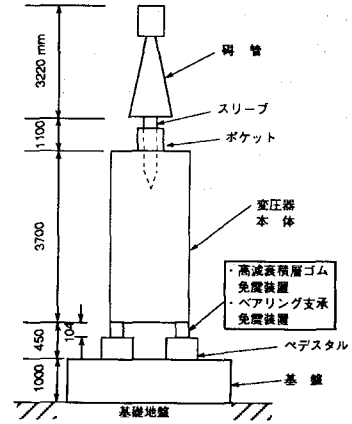


図-2 碍管付き変圧器に免震装置を取り付けた場合の構造

4. 評価結果及び考察

(1) 応答の低減効果 3つの地震動のうちやや長周期成分の比較的卓越したS1F波(α^D :287Gal)を対象として求めた現実的応答の中央値(α^D に対する設計応答値 q^D を応答係数の中央値1.21で除して求めたもの)を用いた場合の応答の低減効果について述べる。表-1に評価結果を示す。最初に、碍管部での応答に対する変圧器基礎部での応答の比(応答倍率)を用いて、非免震、高減衰積層ゴム免震及びベアリング支承免震それぞれの応答倍率を比較する。非免震での応答倍率は約2.5であるのに対し、高減衰積層ゴム免震では約1/1.6、ベアリング支承免震では約1/6.0であり、免震によって応答が約1/2から1/6程度低減された。次いで、免震応答に対する非免震応答の比として応答の低減効果を比較すると、高減衰積層ゴムでは約1/4.0、ベアリング支承では約1/15.0であり、積層ゴム免震に比べベアリング支承免震の方の応答が約4倍程度低減された。

表-1 応答の低減効果の評価結果

ケース	1次固有周期(秒)	部位	現実的* 応答値の 中央値 (Gal)	応答倍率(碍管)		損傷部位での 応答倍率 (免震/非免震)	
				各 ケース	免震 非免震	碍管	免震装置
非免震	0.14	碍管	624	2.5	/	/	/
		変圧器基礎	245				
積層 ゴム 免震	1.0	碍管	153	1/1.6	1/4.0	1/4.0	/
		変圧器基礎	245				
ベア リン グ 承 免震	3.0	碍管	40	1/6.0	1/15.0	/	1/1.0
		免震装置	245				
		変圧器基礎	245				

* (1) S1F波(最大加速度287Gal)に対する現実的応答値を記述する。

(2) 現実的応答値の中央値 = (設計応答値) / (応答係数の中央値)
= (設計応答値) / 1.21

高減衰積層ゴム免震では約1/4.0、ベアリング支承では約1/15.0であり、積層ゴム免震に比べベアリング支承免震の方の応答が約4倍程度低減された。

免震構造系を対象として損傷を評価する場合には、構造系の損傷部位での応答と機能喪失限界値とから損傷確率を求めるので、損傷部位を対象として応答倍率を比較する必要がある。高減衰積層ゴム免震の損傷部位は碍管部であるので、免震/非免震での応答倍率は上述通り約1/4.0であるが、ベアリング支承免震の場合は免震装置自体であるので、応答倍率は1となる。このように損傷の観点で応答低減効果をみると、ベアリング支承免震の場合には大きな応答低減効果が活かされないという結果となった。

(2) 損傷確率及び損傷頻度の低減効果 最初に、絶対評価について述べる。3.2節の現実的応答値及び機能喪失限界値を用いて(3)式から求めた非免震での α レベル毎の機能喪失の発生確率を図-3(a)に示す。これに3.2節の地震危険度を乗じて求めた α レベル毎の機能喪失の発生頻度を図-3(b)に示す。これを積分することによって、非免震での損傷頻度 λ_{without} は約 1.0×10^3 (回/年)となった。耐用期間40年間の損傷確率 P_t は(1)式から約0.04となったので、これを有意と考え相対評価を行った。次に、同様にして求めた積層ゴム免震及びベアリング支承免震での α レベル毎の機能喪失の発生確率及び発生頻度の結果を図

ー3中に示す。これらから、積層ゴム免震での λ_{with} は約 4.7×10^6 (回/年)、ベアリング支承免震での λ_{with} は約 1.6×10^6 (回/年)となった。

損傷確率の観点から考察する。例えば、図-3(a)の500Galレベルでの非免震・免震両者の損傷確率を比較すると、非免震では約0.8程度であるのに対し、積層ゴム免震では約0.1程度、ベアリング支承免震では約0.05程度であり、非免震に比べ免震の場合の損傷確率は約1/8以下に低減されている。一方、損傷頻度の観点からみると、上述の結果から、非免震に比べ免震の方の損傷頻度は約3桁程度小さい。これは、図-3(b)にみられるように約300Gal以下の地震動の単位Gal当りの発生頻度が急激に減少しているためである。しかしながら、積層ゴム免震とベアリング支承免震への影響は少なく、両者の損傷頻度の違いは比較的小さい。

以上のような損傷確率及び損傷頻度の違いは、免震装置のタイプ及び力学特性、入力地震動の周波数特性の違い、地震危険度の程度、現実的応答値及び機能喪失限界値の精度によっても大きく異なると考えられる。そこで、今回の評価結果は、機器を免震構造化した場合の1つの目安ではあるが暫定的なものである。これらの精度の向上を図るためには、上述の項目を詳細に検討する必要があると共に、それぞれの項目は不確かさを有しているため、不確かさ解析を行いその程度を明らかにする必要があると考える。

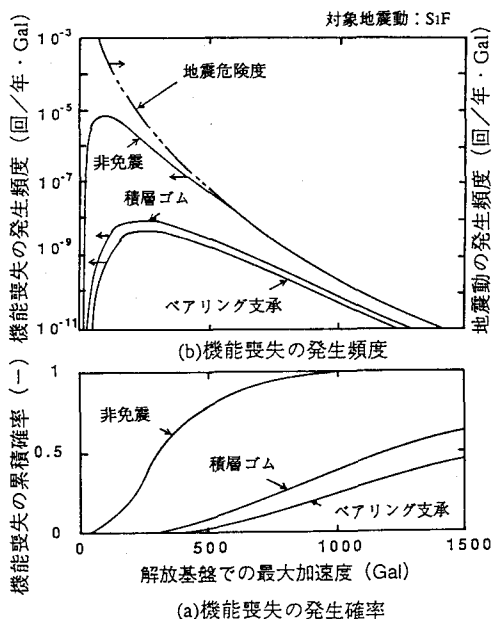


図-3 機能喪失の発生確率と発生頻度の計算結果

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。提案した機器免震の有効性評価法を用いて、碍管付き起動変圧器を高減衰積層ゴム及びベアリング支承免震装置で免震構造化した場合それぞれでの有効性を評価した。応答低減効果としては、ベアリング支承免震の方が高減衰積層ゴム免震のものに比べ大きい、この性能が活かされず損傷頻度に大きな違いがなかった。免震装置の免震性能を評価する場合には、応答の観点だけでなく、損傷の観点からも行う必要がある。この意味でも提案する手法は有用と考える。

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：地震時特定事故シーケンス発生頻度の感度解析(その2)、第5回確率論的安全評価(PSA)に関する国内シンポジウム論文集、IAE-R9006、1990年。
- (4) 蛭沢勝三ほか：確率論的地震危険度の評価手順と感度解析、土木学会論文報告集、第437号/I-17、1991年。
- (5) Ebisawa, K et al.: Evaluation of response factors for seismic risk analysis of nuclear power plants, SMiRT 11th, M13/4,1991。
- (6) 蛭沢勝三ほか：確率論的地震リスク評価における「応答係数」の非線形性がシステム信頼性に及ぼす影響の検討、JCOSAR'91論文集、[A-11]、1991年。
- (7) United States Nuclear Regulatory Commission: NUREG-1150,1989。
- (8) 竹ノ内勇ほか：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、第22回地震工学研究発表会、No 48、1993年。
- (9) 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。