電算機システムの筐体・機器の耐震解析法の研究*

丹羽 博 志^{*1}, 福井 英 博^{*2}
佐々木 陽 一^{*3}, 原 文 雄^{*4}Seismic Analysis Method for Cabinets and Other Components of
a Process Computer SystemHiroshi NIWA, Hidehiro FUKUI,
Youichi SASAKI and Fumio HARA

A process computer system consists of several cabinets connected to each other. Each cabinet includes many boards and other components. A vibration modeling method for these row cabinets and their internal components for evaluating the functional capability of process computer systems during earthquakes was proposed, and used for vibration analysis of process computer system cabinets. By comparison of the analytical results with test results, the usefulness of the modeling method was verified. By use of this method, the seismic capability including the functional capability of process computer systems can be evaluated solely by analysis.

Key Words: Vibration of Mechanism, Seismic Motion, Forced Vibration, Information Processing Equipment, Functional Capability, Eigenvalue Analysis, Vibration Analysis

1. は じ め に

従来、電算機システムは製品認定試験として工業用計算機設置環境基準⁽¹⁾に基づき振動試験を実施し、耐震性能の把握を行っており、設計段階での構造解析により耐震性能の予測をするということとはなされていなかった。しかし、電算機システムの動的な機能を含めて解析により耐震性能を評価することができれば、試験の必要もなくなるし、また、設計段階でその耐震性を予測できるので設計の変更も容易となる。

中央演算装置、主記憶装置、磁気ディスク装置などの電算機システムの各機器は一般に基板等の部品からなり、それらが鋼板で構成された直方体の容器に収められて機器を構成している。さらにこれらの収納機器は電算機システムの筐体内に収納され筐体の柱や横梁に固定されている。したがって、筐体が地震力によって振動すると内部の各機器もその影響を受けて振動

し、機器、基板やその上の素子等には慣性力が働くことになる。これらの機器の耐震性を評価するためには筐体の地震時における応答を解析的に求めることが必要である。

電算機システムの筐体の構造部材はフレーム材と板材であり、モデル化は比較的容易であるが、収納機器は各種の物があり、筐体全体の剛性への影響も無視し得ないため、全体としてはモデル化は複雑となる。収納機器を忠実にモデル化すると要素数が増え、解析モデルの規模が大きくなって、モデル作成の手間や計算費用が増大するため実用的でない。このために、収納機器はその剛性寄与を考慮した上で簡略化してモデル化することが重要である。

本報では原子力発電所で用いられている代表的な電算機システム筐体を対象として、有限要素法を用いて耐震解析することとし、筐体と収納機器のモデル化の考え方を示し、試験結果と比較することによりその妥当性を検証した。また、磁気ディスク装置の搭載された筐体について同様に解析し、電算機システムの地震時における機能維持を評価する上で最も重要な磁気ヘッドの所定位置からの位置ズレ(オフトラック量)が解析的に求められることを示す。

* 原稿受付 1997年1月16日。

^{*1} 正員、(株)東芝原子力技術研究所(〒210 川崎市川崎区浮島町4-1)。^{*2} (株)東芝原子力電気計装技術部(〒235 横浜市磯子区新杉田町8)。^{*3} 正員、(財)原子力発電技術機構(〒105 東京都港区虎ノ門4-3-13)。^{*4} 正員、東京理科大学工学部(〒162 東京都新宿区神楽坂1-3)。

2. 列盤筐体の構成と解析モデル化

2.1 列盤筐体の構成 2種類の列盤筐体を解析の対象とする。対象とする列盤筐体はいずれも六面の筐体が1列に結合されたものであり、実際の原子力発電所で使用されているものと同等のシステムを構成している。その概略形状と1面ごとの質量を図1に示す。2種類の列盤筐体では、その質量分布に大きな差がある。列盤筐体①では左右ほぼ対象な質量分布となっているのに対し、列盤筐体②では右にいくほど軽くなっている。したがって、この2種類の列盤筐体について解析を実施すれば、質量分布が振動モードにどう影響するか評価できると考えられる。筐体1面の架構構造を図2に示す。筐体は1面あたり4本の柱と側面板とからなり、側面板と柱はボルト(M 10)結合されている。筐体の剛性はおもにこれらの柱と側面板とで決まっている。さらに筐体の柱は隣の筐体の柱と筐体間ボルト(M 10)により結合されて列盤筐体が構成される。列盤筐体では構成している各筐体が互いに振動的に連成するため、解析が難しくなっている。

これらの筐体には収納機器として、中央演算装置、主記憶装置、電源、磁気ディスク装置およびMT装置等が収納されている。収納機器は一般に板を直方体状に組立てた容器の内部に基板等の部品が収納されている。収納機器の筐体への取付方法は主として2種類に分類される。一つは筐体左右の柱にボルト(M 6)で固定するだけのもの、あるいはさらに収納機器背面側を

筐体の前後に渡されたはりに固定するもの(シャーシ、一部の電源、MT装置等)である。こうした取付方法では、筐体の左右あるいは前後方向に収納機器の容器が補強として働くことになる。もう一つは比較的小形の機器に対する取付方法で筐体の左右方向に渡したはりの一部または床板にボルト(M 6)固定するものである(一部の電源、磁気ディスク装置等)。この取付方法では収納機器は筐体の左右の柱とは連結されていないため筐体の剛性にはほとんど寄与しない。

筐体の正面および背面には扉があるが、扉は筐体にヒンジで取付けられているために筐体との間にはすきまがあり、筐体の剛性にはほとんど影響しないと考えられる。

筐体の底部は一般にC型鋼で組立てられたチャンネルベースにボルト(M 10)結合されている。チャンネルベースは直に固定床に固定される場合と、支持脚を介して固定される場合がある。特に支持脚を介して固定される場合はチャンネルベースC型鋼の断面変形が起こる可能性がある。

2.2 解析モデル はん用有限要素解析コード“NASTRAN”を用いて解析することにし、上記の構成を考慮して各部を以下のようにモデル化した。

(1) 筐体

筐体の柱ははりとしてモデル化する。また、筐体間の柱は前述のように2本の柱が筐体間ボルトにより結合されている。柱2本を一体化して簡単にモデル化すると柱間の相対変形を拘束してしまう。このことを避けるためにより実際に近くなるように別々にはりとしてモデル化し、ボルトと同寸法のはりで結合する。また、各筐体1面ごとに設けられている側面板はシェルでモデル化する。筐体の正面および背面に設けられた扉は、片側がヒンジで筐体に固定されているが反対側

Fig.1 Process computer cabinets

Fig.2 Structural view of a cabinet

(a) Shell element

(b) Beam element

Fig. 3 FEM model

は拘束されていない。このため、筐体の剛性には寄与していないと考えられ、その質量のみを考慮する。

(2) 収納機器

筐体左右の柱に固定するか、あるいは、さらに背面側も固定されている収納機器については容器をシェル要素でモデル化し、筐体とのボルト結合位置で剛に接合する。また、内部部品の質量はその固定位置に付加する。一方、筐体の左右方向に渡したはりまたは床板に固定した収納機器は質量のみを考慮し、その固定位置に付加する。

(3) チャンネルベース

チャンネルベースは断面変形の起こることを考慮してシェル要素でモデル化する。

以上の考え方で作成した解析モデルをシェル要素とはり要素に分けて図3に示す。図3(a)で実線で囲まれた四角の部分がシェル要素であり、図3(b)の実線部分がはり要素を表している。両者を重ねて解析モデルとする。

3. 解析結果と試験結果の比較

解析の対象とした二つの列盤筐体を(財)原子力発電技術機構・多度津試験所の大型高性能振動台上に設置して加振試験を実施した。列盤筐体はそのチャンネルベースを振動台に直接固定した状態で、振動特性を調べるための不連続正弦波掃引試験と応答特性を調べるためのランダム波加振試験を行った。その内容の詳細については次報で報告するが、ここではその試験結果を引用し、解析結果との比較を試みる。

3.1 固有値解析結果 2章で記した解析モデルを用いて、二つの列盤筐体について固有値解析を行った。得られた固有振動数と刺激係数を表1に、また、その振動モードを筐体①、②について図4、5に示す。いずれの列盤筐体についても一次固有振動モードは左右方向の卓越するモードである。二次固有振動モード

Table 1 Natural frequencies of cabinets

Cab. No.	Mode No.	Natural Freq. (Cal.) (Hz)	Participation Fact.		Natural Freq. (Exp.) (Hz)	Damping Factor (Exp.) (%)
			Side-to-Side	Front-to-Back		
①	1	10.1	1.42	0.002	9.6	3.9
	2	22.0	0.013	0.030	—	—
	3	23.7	0.001	1.64	23.7	3.2
②	1	10.8	1.41	0.013	10.0	3.8
	2	22.5	0.046	1.63	23.4	1.9
	3	26.8	0.016	1.80	27.2	2.8

はねじれ振動のモードであり、特に質量分布が左右対象に近い筐体①では刺激係数が小さくなっているのに対し、左側の重い列盤筐体②ではねじれの中心が中央よりも右側に片寄っており、比較的刺激係数が大きい。また、三次固有振動モードは列盤筐体①では前後方向に卓越するモードとなっているが、列盤筐体②では二次固有振動モードと同じようにねじれ振動のモードであり、ねじれの中心が中央より左側に片寄っている。

試験の結果得られた共振振動数と減衰定数を表1に示す。列盤筐体①で二次の固有振動数に相当するモードは刺激係数が小さいため、試験では得られていない。また、試験の結果得られた振動モードを解析の結果と比較して図4、5に示す。振動モードについて比較すると一次モードはどちらの列盤筐体についても左右方向に並進するモードであり、解析と試験の結果はよく一致している。列盤筐体①の三次振動モードはともに解析と試験の結果はほぼ一致している。列盤筐体②の二次モードではねじれの中心も含めてよく一致しているものの、三次モードでは解析の結果に比べ、試験結果はねじれの中心が中央よりになっている。質量分布に片寄りのある列盤筐体②のほうが解析は試験結果と一致しにくいことがわかる。いずれにしても表1に示したように固有振動数で比較すると試験結果と解析結果の差は10%以内の差である。一般に固有振動数の解析結果と実測結果は境界条件等の影響で多少の差が出ることがある。耐震設計では床応答スペクトルの値を振動数方向に±10%拡幅することにより、この誤差の影響を保守的に評価する方法が用いられている。本研究における試験と解析の差はこの拡幅の範囲に収まっている。

3.2 応答解析結果 入力波は筐体の3次までの固有振動を励振できるように、5~30 Hzの範囲で成分を有するランダム波を用いた。また、その最大加速度は工業用計算機設置環境基準に基づき、 2.5 m/s^2 とした。このときの加速度波形とパワースペクトル密度をそれぞれ図6に示す。このランダム波の最大加速度

Fig. 4 Vibration mode of cabinet ①

Fig. 5 Vibration mode of cabinet ②

Fig. 6 Input random wave

を変えて加振試験を実施した。

図6に示したランダム波を列盤筐体の左右方向に入力した場合と前後方向に入力した場合の2ケースについて応答解析を実施した。なお、解析には試験の結果得られた減衰定数(表1)をモデル減衰として用いた。列盤筐体①、②の右端における入力方向の応答加速度の主要機器取付部における分布を左右方向および前後方向について試験結果と比較してそれぞれ図7に示す。図7で白丸は試験結果を、黒丸は解析結果を表

している。解析結果は試験結果とほぼ一致しているが多少大きめの値となっている。特に列盤筐体②を前後方向に加振したときには解析と試験での振動モードの差もあり、応答加速度の差も大きくなっている。図8には加振加速度レベルに対する筐体頂部の応答の変化を示してある。試験は筐体の左右方向から加振試験を実施し、その後方向を変えて前後方向の加振試験を実施している。このため、先に実施した左右方向では入力加速度約 3.0 m/s^2 までしか加振試験を実施していない。それに対して、前後方向は機能限界に達するまで、徐々に入力加速度を大きくしているため、図8では前後方向は左右方向に比べて大きな加速度までの試験結果が記されている。図8によれば筐体頂部における応答は左右方向、前後方向についてそれぞれ加振した入力加速度で 3.0 m/s^2 程度まで線形性が保持されている。入力加速度がさらに大きくなると筐体の応答は多少線形性がくずれてくるようすが観察される。し

Fig. 7 Response acceleration of cabinet

Fig. 8 Response acceleration of cabinet versus input acceleration

かし、原子力発電所の電算機システムの保証加速度レベルである 2.5 m/s^2 までは線形解析モデルが適用できるし、それより高い加振加速度に対しても解析結果は試験結果を上回っていることがわかる。

4. 磁気ディスク筐体への適用

磁気ディスク装置の耐震性は磁気ディスクヘッドのシーク方向(リニアタイプの磁気ディスクでは磁気円板の半径方向)の所定位置からの位置ズレ(オフトラック量)で評価できること、また、そのオフトラック量が磁気ディスク装置のヘッドディスクアセンブリ(HDA)本体の加速度と制御回路の一巡伝達関数を用いて次式で解析できることはすでに報告した⁽²⁾。

$$Y(s) = \frac{1}{1+G(s)} X(s) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$X(s) = \frac{1}{s^2} Z(s)$$

ここで、

$Y(s)$: 位置ズレ(オフトラック)量のラプラス変換

$X(s), Z(s)$: 磁気円板のシーク方向変位、加速度のラプラス変換

$G(s)$: サーボ系の一巡伝達関数

s : ラプラスの演算子

である。

ところで、磁気ディスク装置の HDA 本体は衝撃的な外力から保護するために筐体に据え付けられた収納容器の中でさらに防振ゴムにより支持されている。このため、地震時には筐体の応答が防振ゴムにより増幅されて HDA 本体が振動する。この応答は HDA 本体を質量とし、防振ゴムをばねとする一自由度系の応答として求めることができる。ここでは、筐体解析モデルの磁気ディスク装置の据付位置に一自由度のばね-質量系を設けることにより、HDA 本体の応答加速度を解析する。その結果を用いて、提案した解析手法⁽²⁾によりオフトラック量を求めることができる。

こうして求めたランダム波加振時の HDA 本体の応答加速度の代表的な波形とパワースペクトル密度を試験結果と比較して図 9 に示す。パワースペクトル密度は 20 Hz より高い振動数で試験結果と差があるもののその他の振動数ではよく一致している。解析で得られた HDA 本体の応答加速度を式(1)に用いることにより求めたオフトラック量の代表的な波形とパワースペクトル密度を図 10 に示す。解析結果と試験結果は 20 Hz 以下の振動数成分でパワースペクトル密度もよく一致しているし、また、波形の形状と最大値も試験結果とよく一致していることがわかる。

Fig. 9 Response acceleration of HDA (Calculation versus experiment)

Fig. 10 Response offtrack (Calculation versus experiment)

5. ま と め

電算機システムの列盤筐体の地震応答を有限要素法により解析することを検討し、各部の解析モデル化の

考え方を示した。この解析モデルを用いて固有値解析、応答解析を実施した。その結果、固有振動数では解析結果は試験結果との差は設計で用いる応答スペクトル解析の拡幅の範囲である10%以内に収まることを示した。加速度応答解析の結果は最大加速度が試験結果と一致するか、それより多少大きめの加速度となり安全側の解析が可能であることを示し、解析モデルの妥当性を検証した。また、電算機システムが通常その機能を保証されている加速度レベルに対して線形解析モデルが有効であることを確認した。さらに、磁気ディスク筐体について磁気ディスクのヘッドディスクアセンブリ本体の応答を一自由度モデルを用いて求める手法を示し、電算機システムの機能維持を評価する上で最も重要な磁気ディスクのオフトラック量が求められることを確認した。

本解析モデルを用いることで電算機システムの動的な機能を含めて解析により耐震性の評価が可能となり、試験の必要なくなるため、製品改良や開発段階での評価が容易となる。

本論文は通産省の原子力発電施設の実証試験事業として実施された(財)原子力発電技術機構「電算機システム耐震実証試験」の成果を一部含んでいる。本研究を遂行するにあたり、横浜国立大学の柴田教授に有益なご助言、ご指導をいただいたことを感謝する。また、解析を進めるにあたりご協力頂いた(株)東芝、重電技術研究所の久保田敏春氏に深くお礼申し上げる。

文 献

- (1) (社)日本電子工業振興会編, 工業用計算機設置環境基準, JEIDA-29, (1982), 49.
- (2) 丹羽博志・福井英博・佐々木陽一・原文雄, 磁気ディスク装置の耐震性評価, 機論, 62-603, C(1996), 39-45.