

微振動の解析システムの開発 (その2)

——設計手法とその評価——

蔭 山 満 寺 村 彰
吉 原 醇 一 武 田 寿 一

Design Method for Microvibration Control and Countermeasures (Part 2)

——Analysis Method and Appraisal——

Mitsuru Kageyama Akira Teramura
Jun-ichi Yoshihara Toshikazu Takeda

Abstract

With the remarkable progress of information society, precise manufacturing techniques to produce micron-level parts such as super LSI have spread out into many fields of the industrial world. The precision of manufacture depends to a great extent on microvibration of the environment in which microvibration control and countermeasure design are absolutely necessary. For this type of problem, differing from ordinary earthquake resistance evaluations and vibration nuisances, it is necessary to analyze vibration spectra in plant operation at the micron level, and further, to have a design technique for control in accordance with the allowable vibration characteristics of the precision equipment. This report gives the concepts of microvibration-proof design, the allowable characteristics of precision equipment, vibration sources and calculation results compared with measurement results at completion of construction. These calculations were performed by “Consistent Program of Microvibration-proof Design” which had been newly developed.

概 要

高度情報化社会の発展に伴い、産業分野ではそれを支える超LSIを始めとし様々な産業に精密加工が浸透している。その精度は工場内の作業環境によって大きく影響を受けるため、工場の設計に当たっては、高精度の作業環境を確保するための振動制御技術が不可欠な要素となっている。この種の問題では一般の耐震評価およびこれまでの公害振動などとは異なり、工場操業時の振幅スペクトルをミクロンレベルで評価し、さらにそれを精密機器の振動許容値特性に応じて制御する設計手法を必要とする。

この報告では、精密機器の振動許容値特性の把握に始まり、各種の振動源に対する評価手法、およびその対策方法について、その基本的な考え方を示すとともに、これらの問題を一貫して解析評価し、設計に反映するために開発された総合評価システムV.I.P.による設計予測値とその実測値を対比して示す。

1. はじめに

超 LSI に代表される先端産業の分野においては、精密加工が年々進み、その環境振動は μm 単位以下でも問題となる場合がある。我々は、この分野の研究調査により、単純にその振幅だけが問題ではなく、振動数に大きく依存することを究明し、精密機器の振動許容値特性と

設計評価を直接的な方法で比較するため、独自のスペクトル評価手法を開発してきた。この種のファインピルの設計に当たっては、精密機器の振動許容値特性の調査に始まり、各種の振動源の適切な特性把握を基に、防振計画の総合的な検討によって合理的な経済設計が行なわれる。この意味で、ファインピルは単に器としての建築ではなく、建物それ自体が計算し尽くされた精密機器の一

部として位置付けられるべきものである。以上の微振動評価の他に耐震性評価も一括して扱うために振動総合評価システム(V.I.P.)が開発され、その実績を上げている。

この報告では、V.I.P. システムに組込まれた微振動評価の基本的な考え方と、レイアウト計画および構造計画の検討および修正を行なう上での基礎的な要点、さらに、このV.I.P. システムを用いた実施例について報告する。

2. 精密機器の振動許容値について

精密機器の許容値はこれを目標として設計を進めるものであり、工場の建設コストに大きく関係する最も基本的で重要な要素である。精密機器納入メーカーが規定する値は、我々が調査した結果と比較すると適切にその機器の振動許容値を評価したものは少ない。我々は、各種の重要構造物の振動特性の調査方法をこの種の調査に応用し、振動数領域における適確な調査を進めてきた。その結果、これらの資料を用いて設計した建物での精密機器の振動障害は皆無となっている。

精密機器の振動障害は、機器の構成各部間の相対的な変形に起因すると考えられる。その変形は機器の固有モード振動によって起こり、各部間で逆相となるモード次数ではその支障が最も大きい。そのようなモード形は一般に高次振動で現われるため、機器の振動許容値特性は、高い振動数になる程、小さくなる傾向にある。

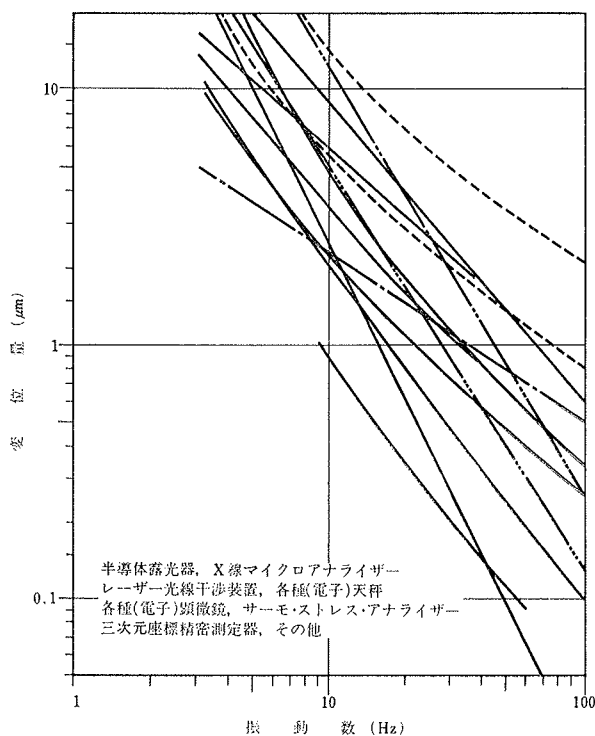
精密機器上の重要な部材点でその振動許容値特性を調査した例を図一1に示す。これらの測点では比較的単純な許容値特性を示す。これらの機器上の点は床に対してその機器固有の増幅特性を持っており、それらの結果を用いて最終的には、床上での振動許容値特性を設定しなければならない。

これらの結果は大きく振動数成分に依存し、この許容値特性の把握なしに、以後の設計計画を進めることはできない。

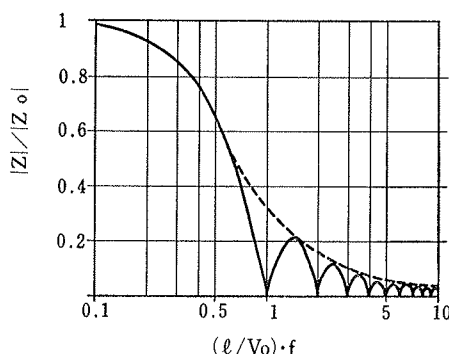
3. 振源につ動いて

建物の微振動を励起する振動源として、地盤の常時微動成分、そして建家内部の設備機器による主として定常振動源、人の歩行などによる作業振動が上げられる。地盤の常時微動入力評価方法について前報を一部修正するため、ここで改めてその基本概念を紹介する。

地盤の常時微動成分は、風、波浪、工場、交通振動などに起因すると考えられ、地表に振源を持つことから、その大部分は表面波として水平方向に伝播してくると考えられるものである。この成分は建物底盤内で位相差を持ち、建家への有効入力成分は低減される。この現象は入力損失効果と呼ばれ、常時微動成分に顕著な現象で、



図一1 各種精密機器の振動許容値特性



図一2 入力損失特性図

$$\frac{X}{X_0} = \left| \frac{V_0}{\pi \ell f} \cdot \sin\left(\frac{\pi \ell f}{V_0}\right) \right| \quad \dots\dots\dots(1)$$

X/X_0 ; 理論入力損失比
 V_0 ; 地盤波動伝播速度
 ℓ ; 建物基礎長さ
 f ; 入力振動数

$$Z/Z_0 = \{L(f)\}^R \quad \dots\dots\dots(2)$$

$L(f)$; (1)式の包絡関数 (図一2の点線に対応)
 Z ; 微動入力成分
 Z_0 ; 自由地表面微動
 R ; 低減係数 (水平=1.0, 上下動 ≤ 1.0)

地中深くに震源を持ち鉛直入射の地震動とは大きく異なる現象である。

この入力損失の理論式は(1)式で示され、その周波数特性は図一2に示されるものである。常時微動の入力損失現象を様々な建物で調査して見ると、水平動成分については図一2の理論曲線そのものより、理論特性値の包絡

曲線に対応する現象が見られた。この要因として常時微動は一定の方向のみから伝播して来るものではなく、あらゆる方向から伝播して来ることによる建家底面形状による波動伝播方向の辺長比などの影響が考えられる。この包絡特性を用いる場合は適切な建物長さを用いて評価する。上下動成分については、入力損失効果の大きい建家と小さい建家が存在し、この要因として、基礎スラブおよび地中ばりで構成される基礎構造の面外剛性がある。この面外剛性に関するR値を用いた(2)式の経験式が実用的であり、このR値については実測値を基にした特性がV.I.P.システムの中に組込まれており、その結果を用いて評価する。

設計入力波は現地観測波をフーリエ変換し、各振動数成分に先の入力損失の係数を掛けて最終的には、その逆変換によって求められる。

入力損失効果は高い振動数成分で大きく、精密機器を対象とした場合、前節でも示したように、高い振動数成分の評価が重要となるため、この入力損失効果を適正に、または、積極的に取入れた評価が不可欠となる。

4. 解析方法

解析モデルは、図-3に示すように、立体モデルとして取扱ひ、振動源の設備機械室および精密機器の設置されるスラブについては、精細なモデル化を行ない、他のスラブについては有効質量を考慮したモデル化によって代表させる。

解析方法は、固有値解析を用いてモード合成法によって行なう。この解析法による利点として設備機械の定常加振の影響するモード次数が分かりやすくその対策検討が容易であること、応答解析において固有値解析の結果がすべての外乱源の解析に共用でき、さらに定常応答解析では時刻歴の解析が不要となるため計算時間の面で有利であるなどが挙げられる。

ただし、このような質点系解析の欠点としてモデル化分割数によってその固有値の数が規定され、固有値以外の振動数領域の振幅成分は過小評価となる傾向にある。特に、モデルの最高次数の固有振動数より高い振動数領域の評価においてこのことが問題となる。V.I.P.システムではこの点をカバーするため、構造物を連続体とした下限値より下回る成分に対しては連続体特性が考慮されるようになっている。

5. 評価法

応答解析によって求められた結果は、精密機器の振動許容値特性に合わせて評価するため、最終的にはその振幅スペクトル成分に分解して評価する。その評価手法を

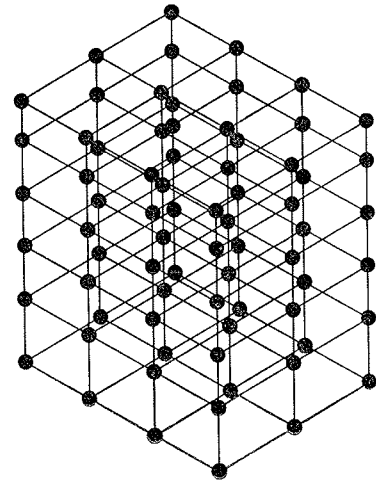


図-3 解析モデル図

次に紹介する。

5.1. 非定常成分の評価

非定常性の強い地動入力および作業振動を振動源とする応答成分については、短い区間でランニング的のフーリエ解析を行ない各振動数成分は、その各解析区間の最大値で評価するピークホールドスペクトル法を用いる。

これは時間的に変動の激しい非定常振動に対して、全区間を一気にフーリエ解析した場合、過渡的に大きな振幅は全時間で平均化されるため、実際の最大振幅に対し、非常に小さい値として評価されることを防ぐためである。

5.2. 定常応答成分の評価

建物内部の設備機械による振動予測は、内部定常加振の応答解析による方法と、非常に高い振動数領域の成分に対しては建物内部の波動距離減衰の実用式によって評価する方法があり、これらはその振幅値の線スペクトルとして評価される。

5.3. 総合評価

最終的には地動入力成分によるその絶対変位成分 $R(f)$ 、建物内部の作業振動 $W(f)$ 、設備機械振動 $M_i(f)$ の各振動成分を総合したスペクトル評価が行なわれ、精密機器の許容振幅特性値と比較される。その総合評価スペクトル $S(f)$ は次式による各成分スペクトル値の2乗和平方根によって評価される。

$$S(f) = \sqrt{R^2(f) + W^2(f) + \sum M_i^2(f)}$$

6. 設計修正および対策方法

前節の評価においてその評価スペクトルが精密機器の許容値をオーバーしている場合、構造モデルまたは設備機械のレイアウトを修正する必要がある。ここではその修正方法および対策に関する基本的な考え方について記す。

6.1. 地動入力に起因する場合

地動入力を要因とする振動成分 R(f) がオーバーしている場合の基本的な考え方は、入力卓越振動数と建家の固有値で刺激関数の大きなものが一致していないか検討し、建家モデルの質量または剛性の一方を大きく変えて固有振動数をずらせる方向で修正する。この対策の典型的な例として免震ビルが挙げられる。

問題となる対象が高い振動数の上下成分の場合は建家基礎底盤剛性を大きくして、入力損失効果を大きくすることも有効な方法と考えられる。

6.2. 内部加振に起因する場合

内部加振に対する応答は固有値解析によるモード形 {u} を用いてその変位応答 {X}, 速度応答 {V}, 加速度応答 {A} を表わすと以下ようになる。

$$\{X\} = P_j \cdot \{u\} \cdot h(f)/k_j \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\{V\} = P_j \cdot \{u\} \cdot h(f)/\sqrt{k_j \cdot m_j} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\{A\} = P_j \cdot \{u\} \cdot h(f)/m_j \quad \dots\dots\dots(5)$$

ただし、h(f) は定常増幅率を示し、P_j, k_j, m_j は j 次の有効加振力、剛性、質量を示す。P_j は有効加振力を示し、次の(6)式で表わされる。

$$P_j = U_n \cdot P \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここで U_n は加振位置のモードベクトルを示し、P はその加振力を示す。

この(6)式より加振振動数に近い固有振動数のモード形の節で加振した場合、その有効加振力を小さくすることができ、一般的には、大ばりなどで剛性を高めた部分または1階地中ばり上の位置が設備機械の設置場所として適していると言え、設備機械床位置の剛性強化あるいは設置場所の変更が考えられる。設備機械で防振を行なう場合であっても、その設置場所は、剛性を高めなければならない。その理由は、防振系と架構の固有振動数が接近している場合、それらが連成して、防振効果が低減するためである。

振源位置での対策を行なっても許容値をオーバーする場合、床振動の許容値に対する変位、速度、加速度応答の比率を検討し、その比率の大きい成分に適した修正を(3)~(5)式の特性に従って行なう。すなわち、低振動数で問題があれば剛性を、高振動数であれば重量を増大することにより応答低減効果の大きいことが分かる。

7. V.I.P. システムの検討例

V.I.P. システムは以上説明してきたすべてが機能的に使用できるよう考慮されており、その他に、一般的な耐震評価も同システムによって行なうことができる。データ作成などでは、できる限りの自動化が計られており、各段階での評価は、グラフィック上で確認しながらその

作業を進めることができるため、きめ細かい検討が容易に行なえ、経済性の高い設計を行なうことができる。

次に、この V.I.P. システムの有効性について検討した解析例を工場建設後に行なった実測値との比較によって示す。

7.1. 設備機械による床振動評価例

建物内の空調機その他の設備機器による定常的な振動源に対して解析した結果と、その測定値の比較を図-4に示す。この結果では端部床板と中央部床板の振幅分布のあり方は比較的良好に合っており、その振幅レベルの比較的小さい場所で若干解析値が下回る傾向にある。その理由は測定値には地動入力による応答成分が含まれているからであり、最終的な総合評価においてはより良く対応していた。ただし、ここではその結果を省略した。

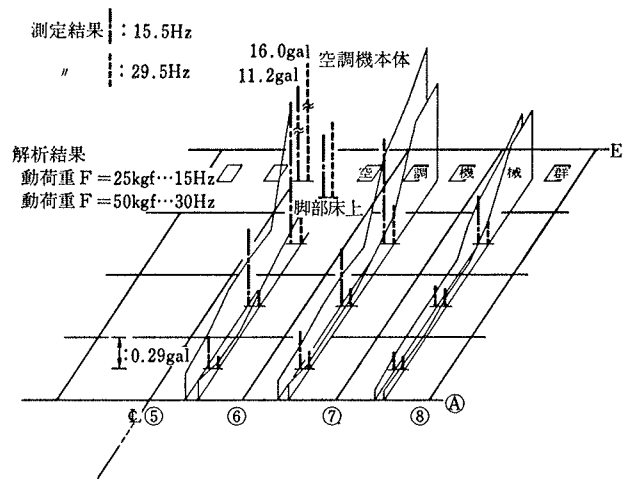


図-4 設備機械振動とその解析値

7.2. 地動外乱に対する応答評価例

ここでは工場近くを貨物列車が通過する時の建家振動について評価した例を示す。図-3は建家の対称性を用いて実架構の1/4でモデル化した例である。図-5と図-6は5階の柱位置における水平および上下動を V.I.P. システムによって予測した結果と竣工後の実測結果を対比したものである。次に、入力成分評価のみ V.I.P. システムで行ない、応答解析段階では、連続体特性を考慮しない質点解析手法のみにより求めた結果と実測値の対比を、図-7と図-8に示す。

以上の結果では V.I.P. システムによる図-5と図-6は全振動数帯域で比較的良好に対応しているのに対し、図-7と図-8は連続体特性を評価しないため高振動数領域において、過小評価になることが分かる。また、入力損失を用いない場合は 10~20 Hz の振動数において実測値より 5~6 倍大きく評価されていたが、当工場の地盤は V_s=390 m/sec と比較的速い地盤であり一般の地盤よりも入力損失効果が少ない例であり、ここではそ

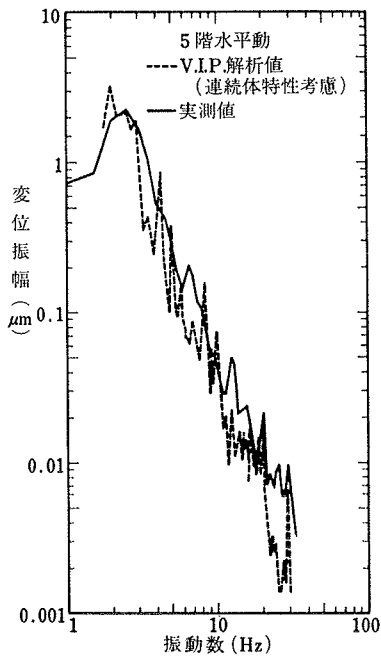


図-5 水平動 V.I.P. 解析値と実測値の比較

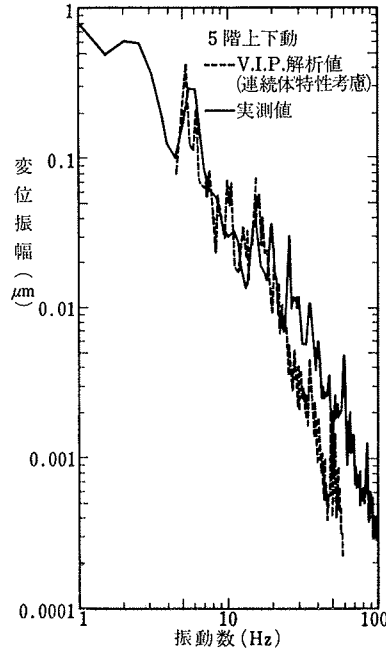


図-6 上下動 V.I.P. 解析値と実測値の比較

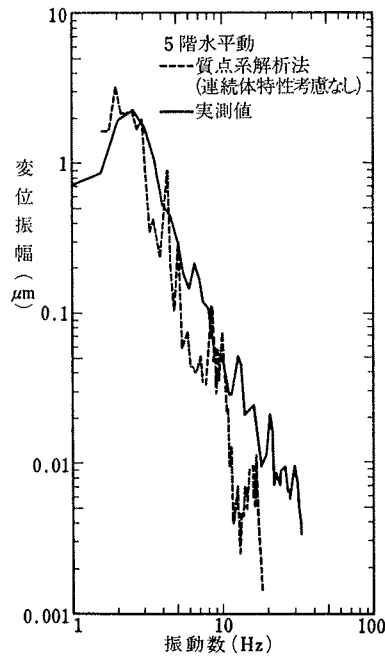


図-7 水平動一般解析値と実測値の比較

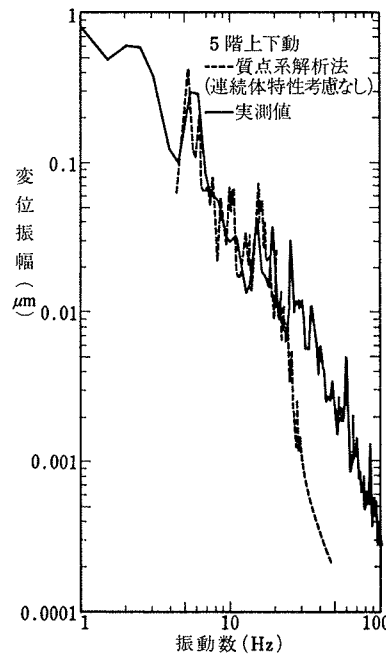


図-8 上下動一般解析値と実測値の比較

の比較資料を省略した。しかし、一般的には入力損失効果を無視した場合、建家の高次振動数域で非常に過大な評価となる。

以上のことより、微振動特性を十分考慮しない解析では高振動数成分で大幅に実現象と掛け離れた評価となる。精密工場の場合、高い振動数領域の評価が重要であ

ることを考えると、この種の解析評価における V.I.P. システムの有用性を窺うことができる。

8. 結び

微小振動を対象とした設計は、高度情報化社会の発展に伴う産業構造の精密化により、今後益々増加するものと考えられる。この種の研究は石油ショック以後から始まり、今日に至っている。その間に蓄積された解析手法および経験的な資料を集大成した解析評価システムが V.I.P. である。このシステムによってその能率は飛躍的に向上した。しかし、このプログラムは構造計画案に対する評価値を予測するものであって、この種の設計では精密機器の振動許容値特性に合わせて建家の構造特性の検討修正を迫られる。その場合、設計者は精密に機器支障を与える構造的なメカニズムを理解して、その構造修正に当たらなければならない。今回の報告では一般の耐震性評価方法とこの種の評価が本質的に異なること、および構造計画に対する基本的な考え方の理解に主眼を置いて述べてきた。この報告がこの種の設計者に参考になれば幸である。

なお、V.I.P. プログラムの開発は、次の部門および担当者との協力で実施されたものである。

樋口元一、板垣勝善、深野 慶、鈴木勝博、田中達彦 (本店 建築設計第四部)、渡辺清治 (本店 技術部)、板橋瑩二、三橋英二 (電子計算センター)

参考文献

- 1) 土と構造物の動的相互作用, 土質工学会, (昭和48.10)
- 2) 山本, 伊勢: 半導体工場建築設備の防振設計, 建築設備士, Vol. 15, No. 5, (昭和58. 5)
- 3) 寺村, 武田, 吉原, 蔭山: 微振動の解析システムの開発, 大林組技術研究所報, No. 32, (1986), pp. 154 ~158