

建物の振動実験法

小西康之
山原浩

§ 1. はじめに

実際の建物が地震を受けたときどんな動きをし、建物の各部にどんな力が作用するのか、厳密に解析することは甚だ困難である。

実際の高層建物の設計に当ってはかなり単純化した仮定を設け、地震時の挙動が理論的に検討される。

地震による建物の応答は、地震波の性質、建物の規模や形状、重量、各部の剛性、基礎の種類、構造体の減衰性、地盤へのエネルギーの逸散等非常に多くの因子が関係してくる。

これらの因子間の相互関係については、まだよくわからない点が多く、時には大胆な仮定を設けたり、時には無視することも多い。

もし実際の地震による建物の応答を、綿密なる計画のもとに直接測ることができれば、応答に寄与する諸因子間の関係をかなり具体化することができるであろう。

しかし、幸か不幸か大地震が起こる確率はきわめて低いうえ、それを待って大がかりな計測網を張っているのも実際上困難である。

そこで人工的に建物を振動させて、建物の様々な動的性状を調べ、建物の振動に寄与する諸因子間の関係を明らかにしようとする試みが行なわれるようになった。

人工的な振動は、一般に与える力もそれによる応答も単純であるため、結果の解析が容易であるという利点はある。

このような人工的な実験によって、建物の持つ固有の諸特性、例えば固有周期、振動モード形、減衰性、エネルギーの逸散量等を知ることができる。

これらの諸特性と建物の規模や形状、構造形式、重量、各部の剛性に基礎の状態等との関係を調べれば、これらの諸因子が建物の振動性状にどのように寄与しているのか知ることができる。

それによって地震時の応答をより正確に推定することができよう。

このような目的で最近高層建物の振動実験が各所で行なわれるようになった。この種の実験がより高精度に、また効果的に行なわれるため、実験上のいろいろな問題点について検討を加えてみることにした。

§ 2. 起振機による強制振動試験

2.1 起振機による強制振動試験の問題点

建物の比較的高い位置に起振機を置き、建物を人工的に振動させる方法が一般に広く行なわれている。起振機は、普通偏心重量の遠心力を利用する構造のものが使用される。

このような方法によって振動実験を行なう場合、技術的に注意しなければならない幾多の問題点がある。

N. Norby Nielsen^{注1)}はつぎのように述べている。

(1) 起振機の回転は階段状 (steady-state) に変化させなくてはならない。これを連続状 (run-down) に変化させると図-1に示すように、実際よりも共振振動数を低く、減衰常数を過大に読取ることになる。

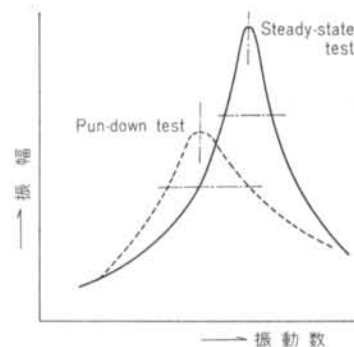


図-1

注1) N. N. Nielsen "Dynamic Response of Multistory Building" California Institute of Technology, Pasadena, California June 1964.

(2) 共振曲線を正確に描くためには、起振機の回転精度を極力高くしなければならない。Nielsen 等が使用している起振機の回転速度は、回転中の回転数の 0.1% の精度で制御できるそうである。

このような Nielsen の主張は、確かに正しいのであるが、(1)の運転方法はその通り実行されても、(2)の 0.1% という高い回転精度を持つ起振機を実際に製作することは技術的に甚だむずかしい。

わずかな負荷の変動に回転数をただちに、しかも、自動的に矯正するフィードバック機構を備えなくてはならない。

起振機の回転精度は、共振振動数の読取りにはほとんど誤差を与えないが、共振曲線から減衰常数を読取る場合に著しく影響する。すなわち起振機の回転速度に変動があると、共振時の振幅が十分でないのである。このため減衰常数を実際よりかなり大きく読取ってしまう。

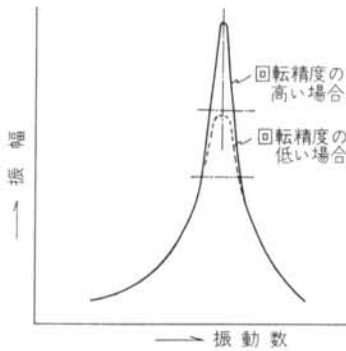


図-2

とくに減衰常数が小さい場合に影響が大きく、わずかな振動数の変化が振幅に著しい変化を与える。もし減衰常数が大きくなれば、振動数の変動による振幅の変化の割合が小さくなり、実用上それほど高い回転精度は要求されなくなる。

2.2 起振機の回転精度

起振機の回転精度は、つぎの 2 つの意味で使われている。

- (1) 回転中の起振機の回転数を変化させ得る最小限のピッチとその時の回転数との比
- (2) 回転中の起振機の回転数の最大変動量とその時の回転数との比

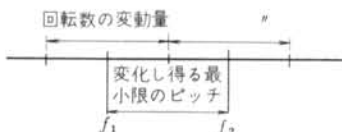


図-3

しかしこの両者は図-3 に示すように、数値的には同じものと考えられる。

さて実際にどの程度の回転精度が必要なのか検討してみよう。

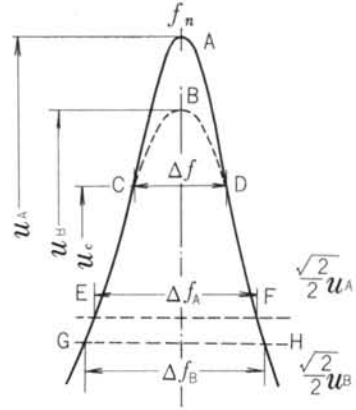


図-4

図-4 に示すように、真の共振曲線を \widehat{CAD} であるとす。いまそのピークの振動数 f_n において \widehat{CD} の回転変動量があったとする。振幅は当然 U_0 より大きく U_A より小さい範囲で変動するであろう。いまかりに振幅をその間の平均値 U_B で読取り、共振曲線を \widehat{CBD} のように作図されたとする。当然 $\sqrt{2}/2 U_{max}$ の横断線は EF から GH に低下する。

$$\beta = \frac{\text{実測の減衰常数}}{\text{真の減衰常数}} = \frac{\Delta f_B}{\Delta f_A}$$

として、回転精度 $\Delta f/f$ と β との関係を作図によって求めると図-5 のようになる。

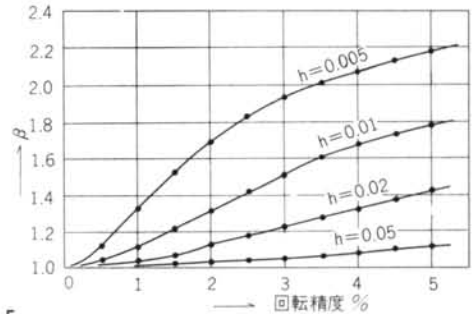


図-5

同図から、真の減衰常数 h が小さいとき、起振機の回転精度が低いと減衰常数の実測誤差が著しく大きく、真の減衰常数が大きい場合には、あまり回転精度の影響を受けないことがわかる。

例えば、 $h=0.005$ の構造物に対して 5% の回転精度を持つ起振機で実験すると、減衰常数の実測値は 2.18 倍すなわち 0.011 と読取ってしまう。

もし $h=0.05$ の構造物に対して同じ 5% の回転精度で実測すれば、その誤差はわずか 12% になる。

このように減衰の小さい建物を実験するとき、起振機の回転精度に特に気をつけなければならない。

さて実際の起振機の回転むらは、大きく分類して次の3つが原因する。

- (1) モーターの供給電圧の電圧変動
- (2) 起振機の機械的負荷の変動
- (3) 構造物の減衰負荷の変動

(1)の電圧変動は、工事中の建物では致命的な障害になる。

実際に大容量の交流定電圧装置は、重量が甚しく大きいというえ容易に得がたい。したがって一般には電圧変動が安定した夜間にも実験を行なわざるを得ない。

(2)の機械的負荷の変動は、起振機の製作においてその工作精度を高くすればかなり小さくできる。特に力の伝達機構や軸受に注意する必要がある。

(3)の構造的負荷の変動とは後章で詳述するように、モーターの動力の一部は、建物の減衰力によって消費される。

この減衰力によって消費される負荷の変動が、減衰の小さい建物の共振時においては著しく大きくなる。

式(3)で計算されるように、減衰力に消費されるエネルギーは振幅の自乗に比例する。共振時にはわずかな振幅数の変化に対して振幅が大きく変動するため、それに伴ってモーターの負荷も著しく変動する。

その対策としては、内部抵抗の小さい(定格出力の大きい)モーターを使用するか、起振機の偏心重量を極力減らすほかない。

しかし $h \approx 0.008$ 以下という減衰の小さい建物では、強制振動によって共振曲線を正確に描くことは事実上不可能である。このような場合は後章で詳述するように、共振時の起振機の急制動によって派生する自由減衰振動によって、減衰性を測定する方法が用いられる。

さて従来われわれが使用していた起振機の回転精度は、常時1~2%、電源状態の悪いときには約3%、さらに共振時には $h=0.05$ 程度として約5%は覚悟しなければならない。

一般にモーターは3相交流分巻整流子型が使われ、刷り角を変えることによって速度調整を行なっている。

負荷の変動に対する速度特性は、交流モーターより直流モーターの方が良く、後者は低速運転時の電氣的効率が前者より著しく高い。

また、直流モーターの速度調整は電圧によって制御されるため、ごく微小な速度調整も可能である。さらに、直流の定電圧制御は、交流に比べて著しく容易であるため、電圧変動の影響も比較的容易に防止することがで

きる。

2.3 所要起振力

実在建物の強制振動試験を行なうとき、一体どのくらいの力が必要なのだろうか、手持の起振機で十分ゆぶることができるだろうかという疑問にまず当面する。

本章では強制振動試験に必要な起振力について検討してみよう。

起振力によってなされる仕事は、構造物の減衰力によって消費されるエネルギーに等しいはずである。

いま起振力を $F_0 \sin \omega t$ とし、その定常状態における変位を $u = u_0 \sin(\omega t - \alpha)$ とすると、質点の速度は

$$\dot{u} = u_0 \omega \cos(\omega t - \alpha)$$

となる。微小時間 dt になす仕事は

$$\Delta W = F_0 \sin \omega t \cdot u_0 \omega \cos(\omega t - \alpha) dt \quad \dots\dots(1)$$

したがって1サイクル当りの仕事は

$$\int_0^T F_0 \sin \omega t \cdot u_0 \omega \cos(\omega t - \alpha) dt = \pi F_0 u_0 \sin \alpha \quad \dots\dots(2)$$

一方、減衰力の大きさは

$$-cu = -cu_0 \omega \cos(\omega t - \alpha)$$

微小時間に消費されるエネルギーは

$$\Delta E = cu_0^2 \omega^2 \cos^2(\omega t - \alpha) dt$$

よって1サイクルのエネルギーは

$$\int_0^T cu_0^2 \omega^2 \cos^2(\omega t - \alpha) dt = \pi cu_0^2 \omega \quad \dots\dots(3)$$

となる。共振時には $\sin \alpha \approx 1$ になるから式(2)、(3)を等しいとおいて

$$F_0 = cu_0 \omega_n \quad \dots\dots(4)$$

ここで $h = c/2\omega_n M$ を式(4)に代入し整理すると

$$F_0 = \frac{8\pi^2 h M u_0}{T_n^2} \quad \dots\dots(5)$$

となる。

ここで h は減衰常数、 T_n は固有周期である。

すなわち所要起振力は、建物の減衰常数、質量、振幅に比例して大きくなり、固有周期の自乗に反比例することになる。

また加振モーメント mr は

$$mr = 2hMu_0 \quad \dots\dots(6)$$

となり、建物の固有周期とは無関係になる。

最近筆者等が地上18階建の高層ビルについて行なった実験例について試算してみると、

$$h = 0.028 \quad (\text{実測値})$$

$$M = 27ts^2/cm \quad (\text{建物の上半分の質量})$$

$$u_0 = 0.0040cm \quad (\text{実測値})$$

$T_n=0.66 \text{ sec}$ (実測値) を式(5)に代入し

$$F_0 = \frac{8 \times 3.14^2 \times 0.028 \times 27 \times 0.004}{0.66^2} = 540 \text{ kg}$$

となる。一方実際に与えた力は502kgであるからほぼ近い値になっている。実際の建物の大きさに惑わされて、直感的にはかなり大きな起振力が必要だと思われがちなのであるが、このように案外小さな力で十分実験の目的を果すことができるのである。

2.4 駆動モーターの所要動力

起振機の駆動モーターに電力を供給し、偏心質量を回しその遠心力で建物を振動させる場合、図-6に示すような等価回路で表わされる。

図-6は直流モーターで駆動する場合であるが、モーターに E_0 なる電圧を与え、モーターが回転すれば逆起電力 E_a を生じ I_a なる電流が流れる。 r_a はモーターの内部抵抗である。

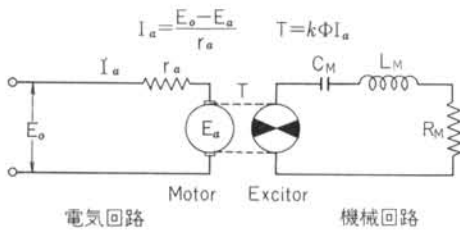


図-6

モーターに発生する駆動トルク T_D によって偏心体が回りその遠心力 $mr\omega^2$ によって建物が振動する。

すなわち、電気回路に消費される電力 $E_a I_a$ の大部分は
(1) 起振機の摩擦によって消費されるエネルギー
(2) 建物の減衰力によって消

図-7

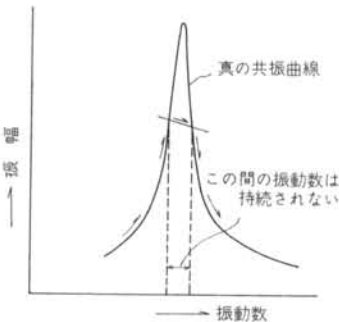


図-8

費されるエネルギーと平衡する。

起振機の摩擦による負荷トルクはモーターの軸から見ると

$$T_L = 2\mu mr\omega^2 r_s + T_s \quad \dots\dots\dots(7)$$

となる。(図-7参照) ここで、 μ : 軸受の摩擦係数、 r_s : 軸受の半径である。

式(7)の第1項は、偏心体の遠心力によって生ずる動負荷トルクであり、 T_s は回転数に無関係な負荷トルクである。

T_s は変速機および各軸受の摩擦によって生じ、偏心体をゆっくり回すときの負荷トルクとして知ることができる。

さて、このような摩擦によって単位時間に消費されるエネルギー W_1 は次式で与えられる。

$$W_1 = \omega T_L \quad \dots\dots\dots(8)$$

一方、建物の減衰力によって単位時間に消費されるエネルギー W_2 は、式(3)、(4)より共振時には

$$W_2 = \frac{F_0^2}{4\omega Mh} = \frac{(mr)^2 \omega^3}{4Mh} \quad \dots\dots\dots(9)$$

となる。すなわち、 W_2 は加振モーメント mr の自乗、角振動数 ω の3乗に比例し、建物の有効質量 M 、減衰常数 h に反比例することがわかる。

したがって比較的質量が小さく、また減衰常数が小さい構造物を、大きな加振モーメントでゆすぶるとかなり大きな動力を要することになる。

また、大きな建物でその質量がかなり大きくても、振動数の低い範囲で実験するならば、案外消費エネルギーは小さくなる。

いま電気エネルギーの機械エネルギーに対する効率を η とすると、エネルギーの平衡は次式で与えられる。

$$\eta W_E = 2\mu mr\omega^2 r_s + \omega T_s + \frac{(mr)^2 \omega^3}{4Mh} \quad \dots\dots\dots(10)$$

ここで W_E は消費電力で $W_E = E_a I_a$ である。

もしモーターの出力が不足し、上式の平衡が保てなくなると、図-8に示すように共振付近の振動数で持続運転することができず、頭のかけた共振曲線が得られる。

このような場合、モーターの出力に応じて偏心モーメント mr を下げなくてはならない。

一般にモーターは短時間であれば、定格出力の2倍ぐらゐの負荷に対して十分に耐える。

しかしモーターの回転数 n は

$$n = \frac{E_0 - I_a r_a}{k\Phi} \quad (\text{分巻直流モーター}) \quad \dots\dots\dots(11)$$

で与えられる。共振付近でわずかな振動数の変化が振幅

に著しく影響し、負荷が大きく変動する。負荷の変動に応じてモーターの電機子電流 I_a が変化し、モーターの回転数 n が安定しなくなる。

したがってこのような負荷の変動の影響を小さくするには、式(1)より電機子の内抵抗のできるだけ小さい、すなわち定格出力の大きいモーターを使用した方がよい。

さて、地上18階建の鉄骨鉄筋コンクリート造建物について、モーターの所要動力を試算してみよう。

短辺方向1次の振動モードについて

$$\text{共振振動数} = 1.52 \text{ c/s (実測値)} \quad \omega = 9.61 \text{ /s}$$

$$M = 27 \text{ t}^2/\text{cm} \quad (\text{建物の上半分の質量})$$

$$h = 0.028 \quad (\text{実測値})$$

である。この時使用した起振機の構造から

$$\mu = 0.05, N = 8.0, r_s = 3 \text{ cm}, T_s = 250 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

$$mr = 5400 \text{ kg} \cdot \text{wt} \cdot \text{cm} \approx 5.4 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2/\text{s}^2 \quad \text{である。}$$

(1) 起振機に消費される摩擦エネルギー

$$W_1 = 2 \times 0.05 \times 5.4 \times 9.6^3 \times 3 + 9.6 \times 250 \\ = 1,433 + 2,400 = 3,833 \text{ kg} \cdot \text{cm}/\text{s} = 376 \text{ watt}$$

(2) 建物の減衰力に消費されるエネルギー

$$W_2 = \frac{5.4^2 \times 9.6^3}{4 \times 27 \times 10^8 \times 0.028} = 8.5 \text{ kg} \cdot \text{cm}/\text{s} \approx 0.8 \text{ watt}$$

この時実際にモーターに与えた電圧、電流は75V, 5.5A, であるから、消費電力は $W_E = 412 \text{ watt}$ であった。

したがって $\eta = 0.9$ 程度を見込めば両者は一致する。

このように重量および減衰常数が大きく、しかも高層のため共振振動数が低い建物では、減衰力によって吸収されるエネルギーが意外に小さくなり、回転速度が安定する。

もし同じ起振機を使って下表に示すような構造物を強制振動させる場合を考えてみよう。

$$\text{構造物重量 (上半分)} \quad 100 \text{ t} \quad M \approx 0.1 \text{ t}^2/\text{cm}$$

$$\text{固有振動数} \quad 3.0 \text{ c/s} \quad \omega = 1.88$$

$$\text{減衰常数} \quad h = 0.02$$

$$W_2 = \frac{5.2^2 \times 1.88^3}{4 \times 0.1 \times 10^8 \times 0.02} = 48,440 \text{ kg} \cdot \text{cm}/\text{s} \\ = 4,750 \text{ watt}$$

すなわち構造物の減衰力だけに4.8kW (6.3H.P.)の動力が必要になり、かなり大型のモーターを用意しなくてはならない。

このような場合は偏心モーメントを使用モーターの定格容量に見合うだけ小さくしなくてはならない。

2.5 共振時の最大振幅

起振機によって強制振動試験を計画するとき、共振時に振幅がどの程度になるか予測しなくてはならない。

共振時の最大振幅は、式(6)より。

$$U_{\text{max}} = \frac{mr}{2hM} \quad \dots\dots\dots(12)$$

となる。上式から計算される U_{max} が、常時微動における振幅よりも少なくとも10倍以上ないと、後の解析に支障を来す。

一般の剛構造建物では $U_{\text{max}} > 30\mu$ 、比較的軟らかい構造物で $U_{\text{max}} > 100\mu$ 程度に考えて偏心モーメントを定めればよい。

§ 3. 起振機の制御方式

起振機を制御するときの要素として重要なものは、回転速度、および複数の起振機を同期運転するときの位相角である。このほか、回転速度の周期的な変動、いわゆる「ワウ」なども、制御機構の安定性の上で重要な問題である。次に、速度および位相制御について、各々の要点を述べてみる。

3.1 速度制御機構

現在まで一般に使われている起振機は、ほとんどすべて単独で運転されるもので、速度安定装置を持たず、一定の供給電力と負荷との間に適当なバランスを保って得られる回転数で使用していた。このため、電源電圧の変動や、負荷の特性変化などによって、あまり安定した回転数は得られなかった。しかし、ある特定の回転数において速度を一定に保つのは、さしてむずかしくないが、起振機として回転数比が10倍以上もの広い範囲にわたって、速度を安定させる必要があるのは、かなり費用のかかる仕事である。

速度制御機構は自動制御の基本的な形式の例として、およそ図-9のようなシステムによるものである。

ここでは回転子Aの速度 v が、速度検出器Bによって、速度に比例するか、あるいは適当な関数関係にある信号 ϕ におきかえられる。この信号は、例えば電圧とか電流、

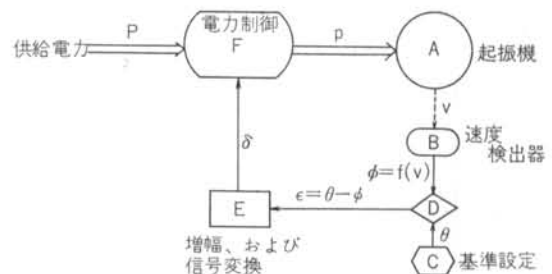


図-9

あるいは周波数、圧力などの物理量である。

これと、Cにおける同種の設定信号 θ との大小関係がDにおいて比較され、誤差信号Eが得られる。さらにEによって増幅し、電力制御装置Fに適当な量 δ に変換して、電動機に供給される電力Pを得る。

ここで、電動機の特長上、回転速度 v の2乗は供給電力Pに比例しないが、フィードバック系の増幅度が十分に大きければ、速度信号 ϕ は設定信号 θ にほぼ等しく制御される。このようにして回転数 v を、設定信号 θ にしたがって変化させることができる。

この外にも、さらに手のこんだ方式が考えられるが、ネガティブ・フィードバック機構による基本的な原理は同様である。

3.2 位相制御機構

建造物の振動試験を行なうとき、2つ以上の振動モードが接近している場合に、これらを分離して測定を行なうため、同じ回転数をもつ複数の起振機を、適当な位置に設置し、同期させて特定のモードを現出させる必要がある。このための位相制御方式として、次に述べる2つの場合が考えられる。まず第1に、同期させるべき起振機の数 n が2台の場合、この2つを対と考へ、おたがいの位相のずれを、双方で調整する方法である。第2は、起振機の数 n が2台、あるいはそれ以上の場合、別に基準となる回転子を考へ、それぞれの起振機が基準回転子と同一位相になるように制御する方法である。この場合には基準回転子に対して、それぞれの起振機は親子関係にある。ここでは、どれか1つの起振機を基準と考えてもよいが、別に負荷変動のない、安定したモデルをベースメーカーとして設置する方が、制御性や安定性の面ですぐれているであろう。いずれの場合にも、2つの回転子の位相差を検出して、その誤差信号を、両方の(双子関係にある場合)、あるいはどちらか一方(親子関係にある場合、子の方)の制御系にフィードバックするのは同様で

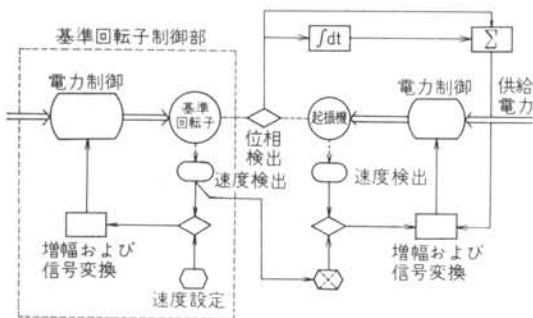


図-10

ある。

この外にも、同期電動機による方法や、フレキシブルシャフトで結合する方法などがあるが、いずれも起振機として適当でないので、ここでは特にとりあげない。

次に、基準回転子に対して、同期をとっている起振機の制御方法について説明してみよう。図-10にその基本的な機構のあらましを示してある。それぞれの回転数制御部分は前に述べた通りであるが、両方の回転子がほぼ同一角速度を持つとした上で、位相制御部分について考えてみる。

位相差検出器によって検出された両方の回転子の位相差信号は、速度制御と同じ系にフィードバックされ、位相差が0になるように電力を制御する。ここで同時に位相差信号の積分値がフィードバックされているのは、速度信号の誤差による定常的な位相差を補うためである。

また、回転体の慣性や、回路の時定数による制御のおくれ、あるいは負荷の変動などのため、しばしば系が不安定になることがあるが、これらに対して速度、および位相差信号の微分成分をフィードバックしたり、各々の増幅度を調整し、適当な値にしなければならない。

このような制御系の応答性や、安定性について検討するために、アナログコンピューターによるシミュレーションが適当である。

図-11はこのようなシミュレーションの一例と、その

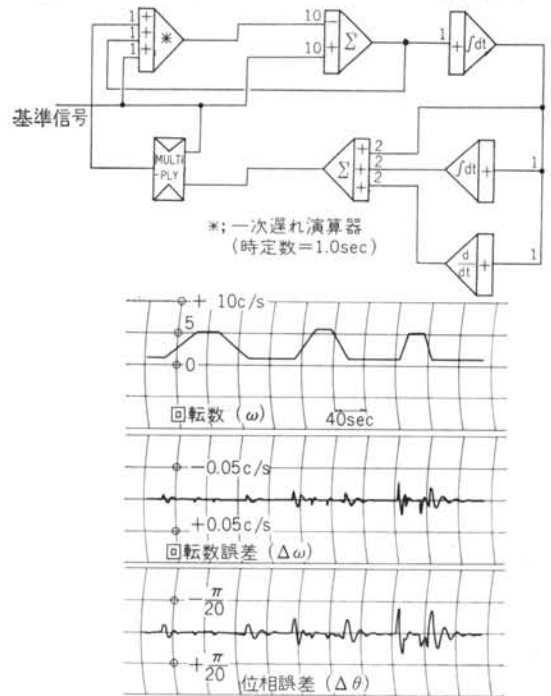


図-11

もし入力電源に電圧変動があれば、インダクションモーターの回転子等機械的慣性が大きいので、その影響はかなり緩和されるだろうが、やはり回転精度を低下させる原因になる。また減衰の小さい構造物の共振付近における著しい負荷の変動には、やはり安定した制御は困難であろう。

文献によれば、同機は4台の起振機の同期運転ができるようである。起振機相互の位相制御の方法および原理については、彼等の論文に示されていないので、どのようになっているのかわからない。

わが国でも最近の高層建物の建設ブームによって、高性能大容量の起振機が必要になってきた。上記の制御方式では、かなりの費用がかかりそうなので、筆者等は同等の性能を目標に独自の方法で試作してみた。

図-13は筆者等が最近試作し、幾多の実験にも試供した起振機の制御方式である。

本装置の動作原理を簡単に説明しておこう。本機は回転速度制御部分と位相制御部分とから成っている。

まず回転速度制御はつぎのようにして行なわれる。

起振機軸に直流発電機が直結されていて、回転速度に

比例した直流電圧が制御盤に戻ってくる。その電圧に電圧変動成分(微分成分)を加算したものを制御盤に設定された基準電圧と比較する。

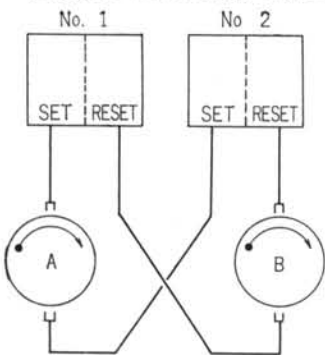


図-14

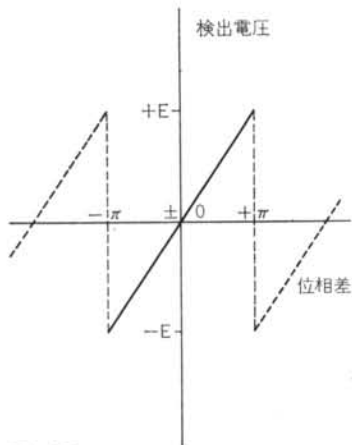
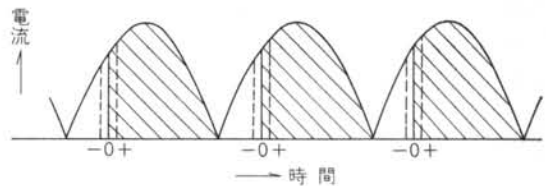


図-15

この両者の信号の正負が交流の位相変化に置きかえられて増幅され、サーボモーターを駆動しスライドトランスが回転する。もし基準電圧に対して、起振機の回転が遅れていればモーターの電源電圧が上昇し、反対に進んでいれば電圧を下げるようにスライドトランスが回転する。このような操作は2台の起振機がそれぞれ独立に行ない、それぞれの回転速度は基準電圧に応じたほぼ同じ速度に自動制御される。

このように2台の起振機がほぼ同じ速度に制御され、あるいは完全に速度が一致したとしても、両者の起振力の方が制御されたことにはならないから、別に位相制御のための機構を備えなくてはならない。

本機は、同期可能な起振機数を2台に限定したため、位相制御方式として前に述べたもののうち、第1の、すなわち両方を対の関係とし、制御信号を両方にフィード



2台の起振機の位相が一致したときの0点に信号が入り、サイリスタが点弧し、斜線部分の電力がモーターに供給される。位相が他よりも遅れるとサイリスタの点弧が早くなり(一側)、反対に進むと点弧が遅れ(十側)、2台の起振機の位相が一致したところで平衡する。

図-16

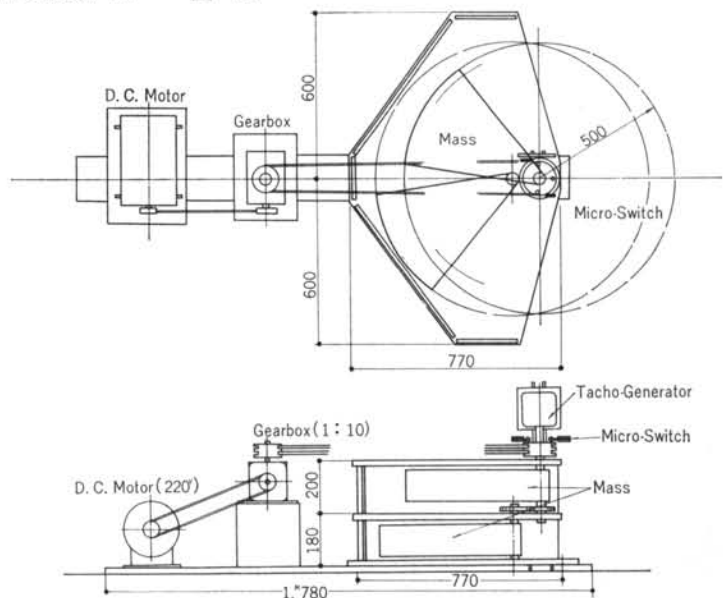


図-17

バックする方式を採用した。

ここで特に本機を設計するにあたって考案された、位相検出器について述べておこう。原理を図-14によって、簡単に説明すると、AおよびBの回転子の1部が、固定側の2n箇所(この場合はn=1)を通過する際に信号(パルス)を発生し、それぞれ相手側の、それ自身に対して π だけずれた点からの信号を1対として、継電器、あるいは双安定マルチバイブレーターなどの記憶素子に導き、各々の回転にともなって、SET-RESETを繰返す。このような対による信号源が2n回線できることになるが、それぞれの状態によって、SETなら1、RESETなら-1の信号を発生するものとしてこれらの平均値のさらに時間平均値をとれば、その結果、B-A間の位相差が図-15のように 2π の周期性を持ち、 $\pm\pi$ の範囲で、その出力は位相差入力に比例する信号として得られる。ここでnは、同期可能な最低回転数 ν 、および応答時間 τ より、次のように定められる。

$$n \leq 1/(\nu \times \tau)$$

本機では、n=1とし、位置検出にマイクロスイッチを使用し、双安定マルチバイブレーターを駆動するものとした。

こうようにして検出された位相差と、その微分成分とを加算した信号によって、電源周波数に同期したパルスを遅延させ、これによってサイリスタを点弧する。図-16に示すように、サイリスタの点弧時期を変えることによって供給電力を制御し、位相を一致させるように動作する。

図-17に、本機の起振部の概要を示してある。ここでは、振動数を1~6 c/sの範囲として設計し、偏心モーメントは最小1,640kg·cm、最大6,840kg·cmになっている。また今回の試作品では、モーターの定格出力を1.1 kW(1 $\frac{1}{2}$ HP)とした。

本試作機を実際の振動実験に使用した結果、改善されるべき諸点として、次のようなものがあげられる。

- (1) 速度制御機構にサーボモーターを使用したため、応答速度がおそく、種々の変動成分に対して十分に追従できない。
- (2) 電動機の定格出力が小さく、したがって内部抵抗が大きいので、しばしば電動機が過熱し、また、共振点付近の負荷変動によって、回転速度が不安定になることがある。
- (3) 位相差検出点の数(n=1)が少ないため、回路の時定数を長くしなければならないので、位相追従性がわるくなり、同期がとれるまでに時間がかかる。本機では、 π の位相差が修正されるときに、約10秒程度であった。

本機の回転数の精度は、およそ次の通りである。

安定化電源装置を備えたとき……0.2%

夜間、電圧の安定しているとき……0.5%

参考までに、本機によって実験した建物の共振曲線の一列を図-18に示した。

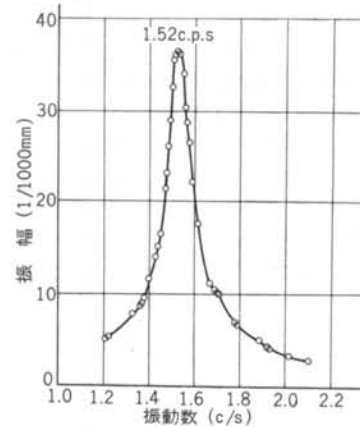


図-18

§ 4. 起振機による自由振動試験

前章で強調したように、強制振動試験によって共振曲線を正確に描こうとすれば、起振機の回転精度をきわめて高くしなくてはならない。それには技術的にかなり困難を伴なう。

正確な共振曲線が必要なのは、結局減衰常数を共振曲線から読取るようとするため、共振振動数は多少頭のつぶれた曲線であっても、実用上期待される精度で読取ることができる。

したがって、もし別の方法で減衰常数を正確に測ることができれば、正確な共振曲線は必要としないことになる。すなわち起振機の回転精度はそれほど高くする必要がなくなる。

筆者等は最近、起振機による自由振動試験を試み、期待通りの成果を得たのでここに紹介することにした。

まず強制振動によって建物を共振付近の振動数でゆすぶり、振幅が十分大きく育ったところで起振機を急速に止める。当然その後自由減衰振動が継続されるから、その振動を記録する。

図-19はこのような方法で実在の建物について行なった自由振動の記録波形である。

本方法は共振時の振幅が常時微動に比べて十分大きく(約20倍以上)育たないと成功しない。

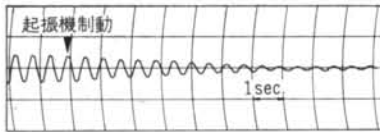


図-19

また、起振機の回転をできるだけ速やかに制止させなくてはならない。起振機の回転速度が低くしかも摩擦抵抗が大きければ、モーターの電源を切るだけの自然制動でよい。しかし、回転速度が比較的高く摩擦抵抗が小さいと起振機は惰性でかなり回ってしまう。

そのような場合にはなんらかのブレーキを装置すればよいが、最も簡単な方法はモーターの発電制動を利用す

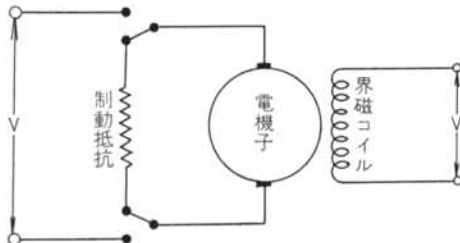


図-20

ることである。

図-20に示すように制動時には界磁電流はそのままとし、電機子の回線をいったん電源から切離し制動抵抗で短絡する。制動抵抗を小さくするほど制動力は大きくなるが、機械的に大きな衝動荷重を伴うから、一応最大電流が定格電流の3倍程度に制動抵抗を定めればよい。

例えば定格電流6Aのモーターでは、逆起電圧を180Vとして $180/3 \times 6 = 10\Omega$ となる。

このような自由振動試験から求めた減衰数値は、共振曲線から求めた値よりも必ず小さく、それだけ真の値に近い。

また自由減衰振動の記録から、建物の固有振動数を読取することもできる。

ただし一般に高次の振動モードに関しては、自由振動試験は適応され難い。一般に高次の振動モードにおける

減衰が大きいため、高次のモードは速やかに消滅し、どうしても最低次のモードが残る。

高次の振動モードやその他減衰の比較的大きい建物では、図-5に示すように起振機の高い回転精度は必要としなくなるから、強制振動試験によって十分実用的な精度で減衰性を求めることができる。

このように強制振動試験と自由振動試験は、ちょうど互いに欠点を埋め合っているから、両者を適宜組み合わせることが望ましい。

§ 5. おわりに

本紙では起振機を使って行なう振動実験について諸々の解説を述べてきた。

実在の建物の持つ幾多の振動モードについて固有周期や減衰常数を知るには、起振機を使って行なう方法が最も簡便にして確実である。

しかし、ある特定の振動モードだけについて固有周期や減衰常数を知ろうとするならば、それぞれのモードに応じた初期変位を与え、瞬間的に開放することによって生ずる自由減衰振動を記録する方法が行なわれる。

初期変位を与えるため、ワイヤーで引張る方法が従来一般に広く行なわれてきたが、最近ロケットの推力を利用する方法が開発され話題をよんでいる。

建物の固有周期だけを知る目的で、常時微動における卓越周期を測ることが行なわれている。この方法は実験のため大がかりな装置や段取りを必要としない。しかし、常時微動に卓越する振動モードの固有周期しか知ることができないうえ、測定値の精度も他の方法に比べかなり低い。

常時微動の計測に当っては、記録された波形が建物のどんな振動モードに相当しているのか確認することが肝要である。