

機械基礎の振動解析と防振設計

Vibration Analysis of Machinery Foundation and Vibration-proof Design

後藤 裕明*
Hiroaki Goto

戸松 征夫**
Masao Tomatsu

要 約

振動障害を生じている清掃工場の送風機基礎の改造検討を行った。

検討にあたり、基礎を剛体モデルと考え、電算機による解析を行うとともに、基礎の振動計測を行った。

基礎改造案として、基礎重量を増す案と基礎を支えるバネ定数を大きくする案の2案を考えた。解析の結果では、バネ定数を大きくする方法でのみ、振動を許容値内におさめられることが判明した。

本検討では、バネ定数を大きくするために、くいを多数打設する方法を採用した。改造後の振動計測の結果、防振効果が確認できた。

本検討を通じ、以下の点が明らかとなった。

- ① くいを多数打設することは、基礎を支えるバネ定数を大きくすることが可能となり、防振対策上有効な手段の一つである。なお、くいのバネ定数算定については、現在のところ確立されたものがないため、今後とも検討が必要である。
- ② 基礎の振動計測結果を行うことにより、基礎振動特性ならびに、地盤の距離減衰定数を決定するデータが得られ、これらを防振設計に反映させることができた。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 検討条件
- §3. 機械基礎の振動解析とくい基礎の評価
- §4. 基礎改造検討の基本方針
- §5. 計測による基礎の振動性状の把握
- §6. 基礎改造の検討
- §7. おわりに

§1. はじめに

本報文は、振動防止を目的とした実際の送風機基礎の

改造検討を具体例として、剛体基礎の定常振動解析および防振対策について報告するものである。

当該送風機は、清掃工場に設けられた、ゴミ消却後の熱風を煙突へ導くための施設で、既設の3基に続き増設された1基である。しかし、当該送風機は、運転開始後に発生した振動公害のため運転中止に至った。そして、機械メーカーによって防振対策が講じられた。すなわち、機械本体の再点検および再調整、また、基礎に対しては基礎コンクリートの増打ち（基礎重量を増す）等の対策がとられた。しかし、防振効果が現われず、再度の基礎改造を余儀なくされた。このような経過で、当社へ基礎改造検討依頼が機械メーカーより持ち込まれた。

以下に、基本的な機械振動の考え方を含め、基礎改造の検討結果を報告する。

* 土木設計部設計課
** 土木設計部設計課副課長

§ 2. 検討条件

2-1 振動解析条件

検討にあたっての振動解析条件を Table 1 に示す。これらの値は依頼者から提示されたものである。

Table1 振動解析条件

| | |
|----------------------|--|
| 機械重量 (ファン+モーター) | $W=1.25 \times 4 + 1.00 \times 2 + 2.30$ $= 9.30 \text{tf}$ 註1) |
| 加振力 (ファン+モーター) | $F=0.200 \times 2 + 0.230$ $= 0.630 \text{tf}$ |
| 加振力振動数 (ファン+モーター) | $f = 20 \text{Hz}$ |
| 許容片振幅 | $a = 20 \mu$ 註2) |
| 許容振動レベル (敷地境界) | $L = 60 \text{dB}$ 註3) |

註1) 機械重量作用位置は、Fig.1に示す。

2) 許容片振幅は、機械に対する制限として、定められるものであり、Fig.1に示す軸受点での値である。

3) 許容値 $L = 60 \text{dB}$ は、4 機全ての運転時の値である。他の3機同時運転時の振動レベル（暗振動）は、 $L_0 = 50 \text{dB}$ である。

振動の許容量は機械に対する許容振幅と敷地境界での振動レベルで規定される。なお、敷地境界までの最短距離は機械の軸受点から10.8mである。

当該送風機は、運転時に敷地境界で約70dBの振動が出ており、10dB以上の低減が必要とされる。

2-2 基礎形状および荷重条件

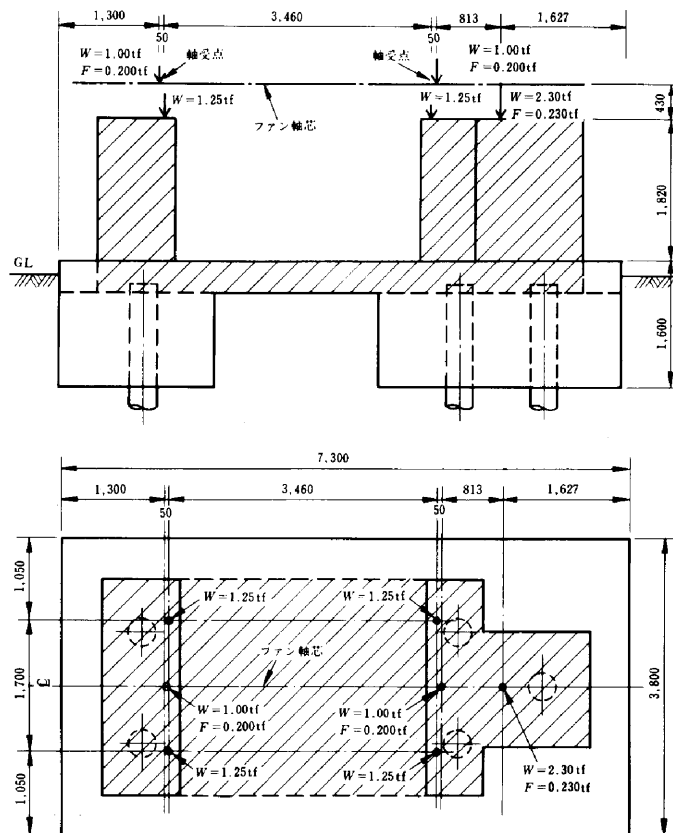
基礎形状および荷重条件を Fig.1 に示す。

§ 3. 機械基礎の振動解析とくい基礎の評価

具体的な基礎改造の検討に先立ち、剛体基礎の定常振動解析について、その基本的な考え方を述べる。また、今回の検討で重要な意味をもつ、くい基礎のパネ定数の算定方法について述べる。

3-1 解析の方法

剛体系基礎の振動解析を行うにあたり、Fig.2に示すように、基礎を1質点剛体にモデル化する。すなわち、機械基礎およびそれに付属する機器の質量をM、基礎を支える地盤のパネ定数をKで表わし、基礎はその重心に対して剛体的に運動すると考える。



註) ・ 上図は、検討依頼時点（補修後）の基礎形状である。
 ・ 部は、原設計における基礎形状である。
 ・ Wは機械重量、Fは加振力を示す。

Fig.1 形状寸法および荷重条件

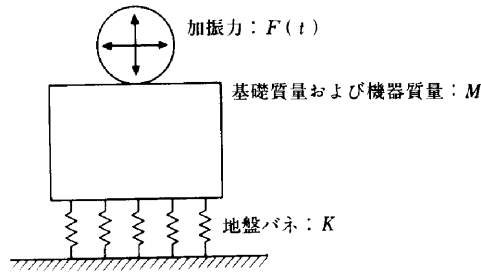


Fig.2 基礎剛体モデル

この時、機械の加振力による基礎の振動は、次の運動方程式で表わされる。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F_0 \sin 2\pi f_0 t \quad (3 \cdot 1)$$

ここに u = 基礎重心の変位 (cm)

\dot{u} : " 速度 (cm/s)

\ddot{u} : " 加速度 (cm/s²)

M : (= W/g) 基礎の質量 (kgf·s²/cm)

C : 減衰定数 (kgf·s/cm)

K : 地盤のバネ定数 (kgf/cm)

F_0 : 加振力 (kgf)

f_0 : 加振力の振動数 (Hz)

t : 時間 (s)

ここで解析に必要な条件は、基礎形状、地盤のバネ定数および加振力の3つであり、上記方程式を解くことにより、基礎の固有振動数、最大変位、および地盤反力などが求められる。

3-2 固有振動数と共振曲線

剛体系基礎の固有振動数は次式で求められる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g \cdot k}{M}} \quad (3 \cdot 2)$$

ここに f : 基礎の固有振動数 (Hz)

g : 重力加速度 (980cm/s²)

一方、加振力の振動数を f_0 とすると f と f_0 の比

$$\beta = \frac{f}{f_0}$$

によって基礎の振動量が変化するが、この関係を示したものが、Fig.3である。Fig.3は共振曲線と呼ばれ、横軸に β 、縦軸に加振力の変位振幅 a に対する基礎の変位振幅倍率 τ をとってある。図中の ζ は減衰係数で、通常は0.2以下である。

これらの曲線は $\beta=1.0$ でピークに達する。すなわち、基礎の減衰が小さい場合でかつ、基礎の固有振動数が加振力の振動数に近い状態にあると、共振して振幅倍率が大きくなり、大きな振動を引起すことを示している。

以下に防振の基本的な考え方を述べる。

- (1) 設計の基本的な考え方として、 $0.8 < \beta < 1.4$ の範囲の基礎は避けるべきである。

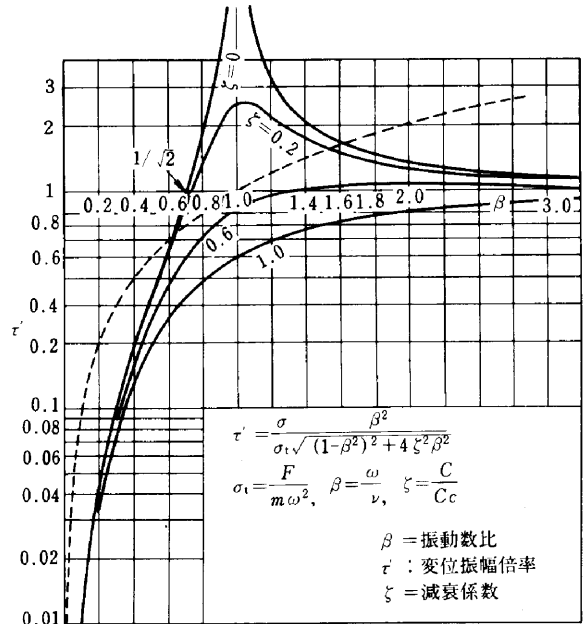


Fig.3 共振曲線

- (2) 低速機械 ($\beta < 1.0$) の場合、地盤のバネ定数を増し β を小さくするように設計すると、振幅倍率を急激に減らすことができ有利である。
- (3) 高速機械 ($\beta > 1.0$) の場合、基礎重量を増し $\beta \approx 2.0$ とするとよい。ただし、Fig.3から $\beta > 1$ の範囲で基礎重量を増すことは、 $\beta < 1$ の範囲で基礎重量を軽減することよりも、その効果は相当劣ることがわかる。
- (4) 共振に近い場合 ($\beta \approx 1.0$) でも、減衰定数が大きい場合や、加振力振幅が小さい場合で、計算された基礎の振幅が小さければ、設計が可能となる。しかし、モデル化の精度を考えると、これは危険な設計となる場合がある。

以上の点に注意し、防振検討を行うことが必要である。

3-3 くい基礎のバネ定数

振動解析で重要な意味をもつ地盤のバネ定数について以下に述べる。

(1) 理想地盤法と地盤係数法

地盤のバネ定数の算定手法として、理想地盤法と地盤係数法がある。両者の特徴を Table 2 に示す。

従来、基礎を支える地盤のバネ定数の算定は、地盤係数法によってきたが、最近になり理想地盤法が提案されるようになった。それ以来、この方法は合理的なものとして多用されており、特に直接基礎においてはその傾向が強い。しかし、この方法では現在のところ、くいの本数、長さおよび材質等を定量的に評価することが不可能である。

このように、くいのバネ定数の算定方法にはまだ確立

されたものがなく、一般には種々の提案式によるバネ定数を総合的に判断しているのが現状である。

Table2 地盤係数法と理想地盤法

| | 地盤係数法 | 理想地盤法 | | | | | | | | |
|-----------|---|--|-----------|--|---------|--|------|--------|-------|--------|
| 考え方 | 地盤を質量のないバネと考え、その単位面積当りのバネ定数を地盤係数 k (kgf/cm ³)とし、基礎-地盤系のバネ定数 K (kgf/cm)を、実験的に求めようとする考え方。 | 地盤を等方等質なる半無限完全弾性体と考え、基礎-地盤系のバネ定数 K (kgf/cm)を、地盤の横波速度(V_s)とポアソン比(ν)という物理量から理論的に求めようとする考え方。 | | | | | | | | |
| 地盤のバネ定数 | 基礎の接地面積に比例する。 $K \propto S$ | 基礎の接地面積の平方根に比例する。 $K \propto \sqrt{S}$ | | | | | | | | |
| 減衰定数の評価 | 評価が難しい。 | 地下逸散減衰として解析的に評価できる。 | | | | | | | | |
| 杭の評価 | 実験的に種々の式が提案されている。 | 一般に地盤に対する補剛効果としてとらえる。 | | | | | | | | |
| | | <table border="1"> <tr> <td>くいによる補剛効果</td> <td></td> </tr> <tr> <td>地盤：補剛効果</td> <td></td> </tr> <tr> <td>軟弱地盤</td> <td>30~50%</td> </tr> <tr> <td>中位の地盤</td> <td>10~30%</td> </tr> <tr> <td>良質地盤</td> <td>0~10%</td> </tr> </table> | くいによる補剛効果 | | 地盤：補剛効果 | | 軟弱地盤 | 30~50% | 中位の地盤 | 10~30% |
| くいによる補剛効果 | | | | | | | | | | |
| 地盤：補剛効果 | | | | | | | | | | |
| 軟弱地盤 | 30~50% | | | | | | | | | |
| 中位の地盤 | 10~30% | | | | | | | | | |
| 良質地盤 | 0~10% | | | | | | | | | |

(2) くいのバネ定数

現在提案されている種々の算定式を水平と鉛直に分けて紹介する。

a) 水平方向バネ定数

基本的には、いずれの提案式も頭部に水平力 $p(t)$ を受けたときの単ぐい頭部変位 δ_t (cm)を求めることから、くいの水平バネ定数を求めるものである。すなわち、くいの水平バネ定数 K_H (tf/cm)は次式で与えられる。

$$K_H = P / \delta_t \quad (3 \cdot 3)$$

さらに、頭部変位 δ_t は、Y.L.Changの理論解(頭部固定、半無限長のくい)から次式で与えられる。

$$\delta_t = P / 4EI\beta^3 \quad (3 \cdot 4)$$

(3・3)、(3・4)式より、 K_H は次式で与えられる。

$$K_H = 4EI\beta^3 \quad (3 \cdot 5)$$

ここに、 K_H ：くいの水平バネ定数(tf/cm)

EI ：くいの曲げ剛性(tf・cm²)

β ：くいの特性値(cm⁻¹)

$$= \sqrt[4]{Es/4EI}$$

ここに、 Es ：横方向反力係数(tf/cm²)

上式における Es の算定方法が提案式により相違する。

それらを以下に示す。

① NOVAKによる算定

NOVAK³⁾は、 Es を次式で与えている。

$$Es = G_s \cdot Su_1 = \rho \cdot V_s^2 \cdot Su_1 \quad (3 \cdot 6)$$

ここに G_s ：せん断弾性係数(tf/cm²)

ρ ：地盤の密度(tf・s²/cm²)

V_s ：横波弾性速度(cm/s)

Su_1 ：地盤のパラメータ(Table 3 参照)

② 山原による算定

山原²⁾は、 Es を次式で与えている。

$$Es = (Kh)_L / l \quad (3 \cdot 7)$$

ここに、 $(Kh)_L$ ：くいを円筒剛体と仮想した場合のバネ定数(tf/cm)(Fig.4)。

l ：くい長(cm)

③ 道路橋示方書による算定

道路橋示方書⁴⁾では、 Es を次式で与えている。

$$Es = kh \cdot D \quad (3 \cdot 8)$$

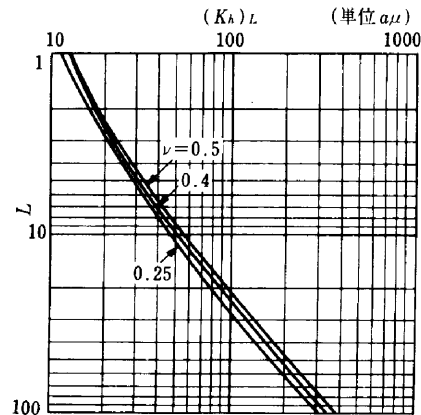


Fig.4 円筒剛体の水平ばね定数

Table3 剛性と減衰のパラメーター

| 運動 | 土質 | 側面 | | 底面 | |
|-----|-----|-------------------|------------------------|------------------|------------------------|
| | | Su_1 | $\bar{S}u_2$ | Cu_1 | $\bar{C}u_2$ |
| 水平 | 粘性土 | $Su_1 = 4.1$ | $\bar{S}u_2 = 10.6$ | $Cu_1 = 5.1$ | $\bar{C}u_2 = 3.2$ |
| | 砂質土 | $Su_1 = 4.0$ | $\bar{S}u_2 = 9.1$ | $Cu_1 = 4.7$ | $\bar{C}u_2 = 2.8$ |
| 回転 | 粘性土 | $S\phi_1 = 2.5$ | $\bar{S}\phi_2 = 1.8$ | $C\phi_1 = 4.3$ | $\bar{C}\phi_2 = 0.7$ |
| | 砂質土 | | | $C\phi_1 = 3.3$ | $\bar{C}\phi_2 = 0.5$ |
| ねじれ | 粘性土 | $S\zeta_1 = 10.2$ | $\bar{S}\zeta_2 = 5.4$ | $C\zeta_1 = 4.3$ | $\bar{C}\zeta_2 = 0.7$ |
| | 砂質土 | | | | |
| 鉛直 | 粘性土 | $Sw_1 = 2.7$ | $\bar{S}w_2 = 6.7$ | $Cw_1 = 7.5$ | $\bar{C}w_2 = 6.8$ |
| | 砂質土 | | | $Cw_1 = 5.2$ | $\bar{C}w_2 = 5.0$ |

ここに kh : 横方向地盤反力係数(kgf/cm³)
 $= k_0 \cdot y^{-1/2}$
 k_0 : 設計地盤面の変位量を 1 cm としたときの、横方向地盤反力係数(kgf/cm³)
 y : 基準変位量(cm)
 D : くい径(cm)

b) 鉛直方向バネ定数

① NOVAK による算定

NOVAK³⁾は、鉛直バネ定数を次式で与えている。
 $K_V = E \cdot A \cdot \sqrt{\alpha} \cdot (1 + e^{-2\sqrt{\alpha}l}) / (1 - e^{-2\sqrt{\alpha}l})$ (3.9)
 ここに、 E : ぐいの弾性係数(tf/cm²)
 A : ぐいの断面積(cm²)
 $\alpha = G_s \cdot Sw_1 / EA = \rho V_s^2 \cdot Sw_1 / EA$
 Sw_1 : 地盤のパラメータ (Table 3 参照)
 l : くい長(cm)

② 山原による算定

山原²⁾は、鉛直バネ定数を次式で与えている。
 $K_V = \{A \cdot E \cdot \alpha (Kp \cdot \cosh \alpha l + A \cdot E \cdot \alpha \sinh \alpha l) \cosh \alpha l\} / \{A \cdot E \cdot \alpha + (Kp \cosh \alpha l + AE \alpha \sinh \alpha l) \sinh \alpha l\}$ (3.10)
 ここに、 E : ぐいの弾性係数(tf/cm²)
 A : ぐいの断面積(cm²)
 $\alpha = \sqrt{k/AE}$
 k : $(Kf)_L / l$

$(Kf)_L$: くい側面の上下動平均バネ定数(tf/cm) (Fig.5 参照)
 Kp : ぐいの先端上下動バネ定数(tf/cm) (Fig.6 参照)

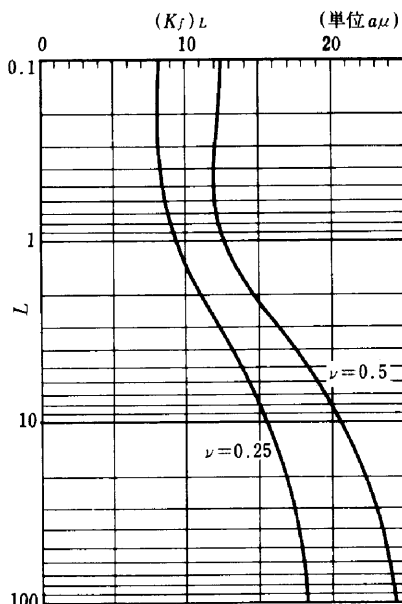


Fig.5 くい側面の上下動平均ばね定数

l : くい長(cm)
 ③ 道路橋示方書による算定
 道路橋示方書⁴⁾では、鉛直バネ定数を次式で与えている。
 $K_V = a \cdot Ap \cdot Ep / l$ (3.11)
 ここに、 Ap : くい純断面積(cm²)
 Ep : ぐいの弾性係数(tf/cm²)
 l : くい長(cm)
 a : 載荷試験から求められた係数

§ 4. 基礎改造検討の基本方針

これより振動障害を生じている基礎を全面的に取り壊し新設する方針で検討に入る。

検討にあたり、その基本方針を以下に示す。

1. 基礎をモデル化し、電算による振動解析を行う。
2. 基礎の振動計測を行い、その振動特性データを得る。
3. 振動計測結果を踏まえ、基礎モデル定数を修正し、整合性をはかる。
4. 以上の検討をもとに、最適な基礎改造の検討を行う。

基本方針に従い、振動解析および振動計測を行うが、§5では基本方針の1, 2, 3をまとめた形で述べる。

§ 5. 計測による基礎の振動性状の把握

5-1 計測項目

(1) 基礎の固有振動数

地盤のバネ定数の算定方法に確立されたものがないため、本検討では、計測による基礎の固有振動数から逆算

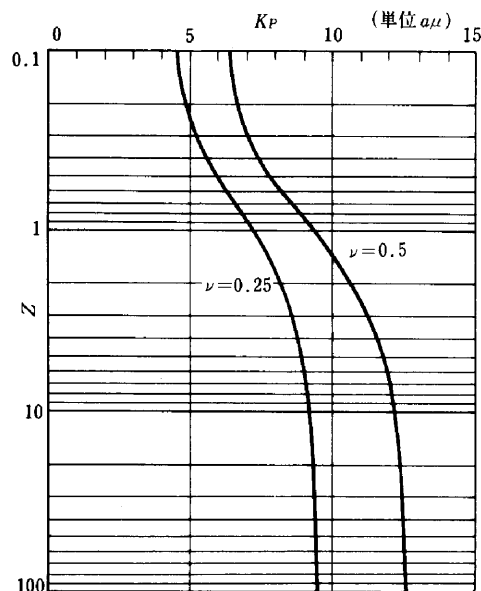


Fig.6 くい先端の上下動ばね定数

Table4 基礎の固有振動数

| 実測値 | | | | | | f_y (Hz) | | | f_z (Hz) | | | 片振幅 (中心軸上) |
|-----|--|--|--|--|--|------------------|------------|------|------------------|------------|------|-----------------------------------|
| | | | | | | 11.3, 16.1, 20.1 | 23.6, 29.9 | | 11.3, 16.1, 19.5 | 23.6, 29.9 | | $a_y = 26.0\mu$ $a_z = 5.5\mu$ |
| 計算値 | バネ値 | | | | | f_y (Hz) | | | f_z (Hz) | | | 片振幅 (中心軸上) |
| | K_x ($\times 10^5 \text{tf/m}$) | K_y ($\times 10^5 \text{tf/m}$) | K_z ($\times 10^5 \text{tf/m}$) | K_{yz} ($\times 10^5 \text{tf}\cdot\text{m/rad}$) | K_{zx} ($\times 10^5 \text{tf}\cdot\text{m/rad}$) | 1次 | 並進 | 2次 | 1次 | 並進 | 2次 | $a_y(\mu)$ $a_z(\mu)$ |
| | 0.92 | 1.28 | 1.88 | 7.00 | 6.00 | 11.3 | 16.1 | 20.4 | 11.7 | 19.5 | 23.7 | 23.6 5.2 |

して、地盤のバネ定数を決定することとする。

(2) 地盤の距離減衰特性

基礎からの測線上に測点を設け、同時振動計測(各測点での振幅の計測)を行い、地盤の距離減衰式を求める。

(3) 基礎の振動モード

基礎上に設けた測点で、同時振動計測を行い、基礎の振動モードの特性を明らかにし、防振対策に反映させる。

5-2 計測結果

(1) 基礎の固有振動数

常時微動計測により、基礎の卓越振動数を求めた。次に基礎モデルにおいて、地盤のバネ定数を仮定し、計算結果と計測結果が等しくなるバネ定数を逆算した (Table 4 参照)。

(2) 地盤の距離減衰

a) 水平方向の距離減衰

水平方向の振幅と距離との関係の実測値を Fig.7 に示す。振動中心(基礎重心)からの距離 r_1 と r_2 の間での振動の減衰式を次式で考える。

$$\frac{u_2}{u_1} = \sqrt{\frac{r_1}{r_2}} e^{-\alpha(r_2-r_1)} \quad (5 \cdot 1)$$

ここに、 u_1 : 距離 r_1 点での変位振幅

u_2 : " r_2 "

α : 距離減衰係数

Fig.7 より、 $r_1=5.0\text{m}$ のとき $u_1=9.3\mu$ 、また $r_2=10.8\text{m}$ のとき $u_2=2.4\mu$ とすると、上式より、 $\alpha=0.167$ である。したがって、水平方向距離減衰式は、次式となる。

$$u_2 = u_1 \sqrt{\frac{r_1}{r_2}} e^{-0.167(r_2-r_1)} \quad (5 \cdot 2)$$

この距離減衰式を Fig.7 に実線で示す。

b) 鉛直方向の距離減衰

鉛直方向の振幅と距離との関係の実測値を Fig.8 に示す。

Fig.8 より、 $r_1=5.0\text{m}$ のとき $u_1=4.4\mu$ また、 $r_2=10.8\text{m}$ のとき $u_2=2.5\mu$ とすると、 $\alpha=0.031$ である。

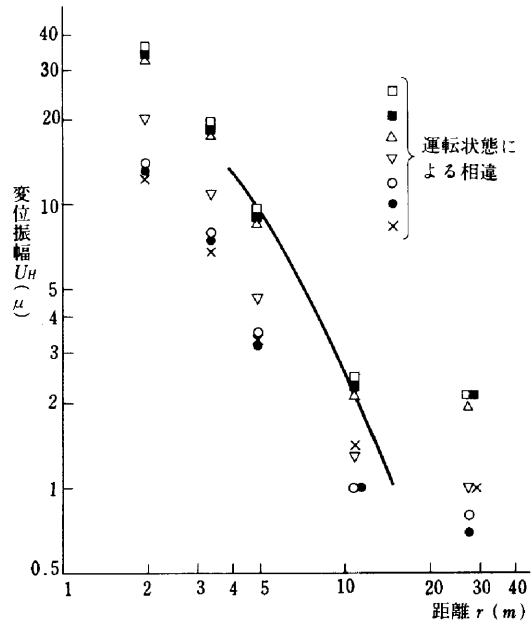


Fig.7 水平方向振動の距離減衰

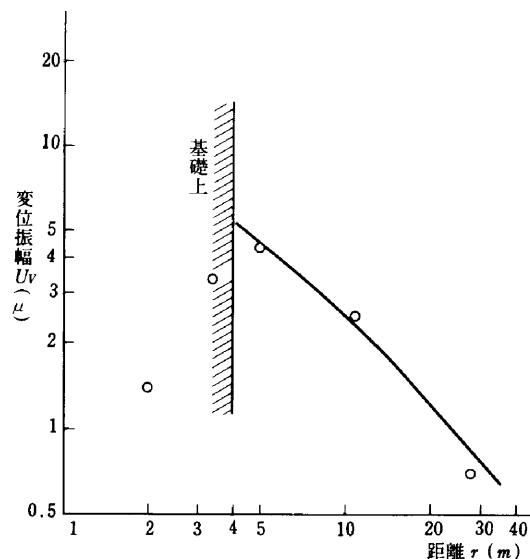


Fig.8 垂直方向振動の距離減衰

したがって、鉛直方向距離減衰式は、

$$u_2 = u_1 \sqrt{\frac{r_1}{r_2}} e^{-0.031(r_2-r_1)} \quad (5 \cdot 3)$$

となる。この減衰式を Fig.8 に実線で示す。

(3) 基礎の振動モード

基礎の振動モードを計測するため Fig.9 に示すとおり、基礎上に6点の測定点を取り、同時振動計測を行った。

計測の結果得られた変位波形を Fig.10, Fig.11 に示す。

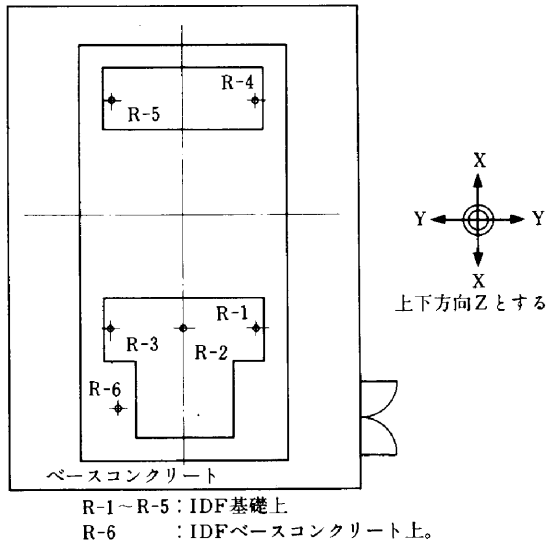


Fig.9 測定位置図

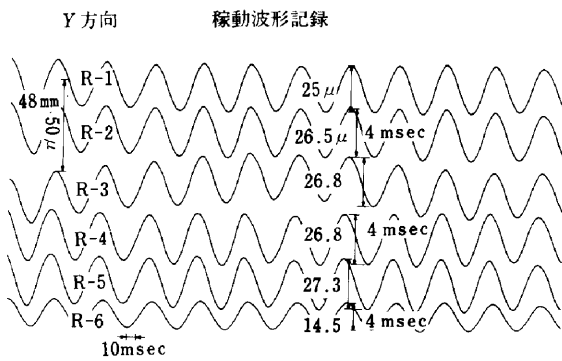


Fig.10 稼働時波形記録 (y 方向)

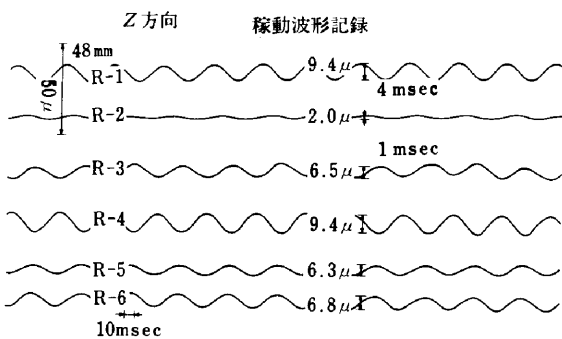


Fig.11 稼働時波形記録 (Z 方向)

5-3 計測結果のまとめ

計測結果から基礎の振動性状について次の点が指摘できる。

(1) 基礎振動波形はすべての測点で約20Hzの正弦波が卓越している。これは加振力振動数20Hzに対応している。したがって、単純なモデルでの解析が可能と考えられる (Fig.10, 11)。

(2) 水平方向の振幅は基礎中心軸付近で大きい。距離減衰も大きい。一方、鉛直方向の振幅は中心軸付近で小さいが、距離減衰も小さい。このため、敷地境界 (r=10.8m)での振幅は両方向とも2~3μで同程度である (Fig.7, 8)。

(3) 鉛直方向の振幅は中心軸から基礎端部に向かって増大している (Fig.8)。また、振動モードの計測結果から、ロッキング現象が発生していることが明らかである (Fig.11)。

(4) ロッキング現象により、あたかも基礎端部が振動源のようになっている。この時、振幅が中心軸付近の3~5倍に増大しているとともに、敷地境界の方に振動源が近寄ったような現象を呈しており、防振設計上から非常に不利な点である。

(5) 基礎の振動数および振幅の計算値を計測値を完全に一致させることは難しいが、解析モデルの簡略化等を考慮すると、両者は対応づけることができたと判断する。

§ 6. 基礎改造の検討

6-1 基礎改造の方針

モデル解析と振動計測から、基礎は共振域に近く、振動モードはロッキングが顕著であることが判明した。

共振域を避ける方法として、基礎重量を増す方法 (マスカ案) と、バネ定数を大きくする方法 (パネ案) が考えられる。以下に具体的検討を示す。

検討にあたり、敷地境界で許容振動レベルを与える基礎上で許容振幅を設定するとともに機械に対する許容振幅を加味し、これを満足する基礎改造方法を選定する。

6-2 基礎上で許容振幅の設定

(1) 変位振幅 u と振動レベル VL の関係

基礎地盤の卓越振動数 f=20Hz (振動計測結果より) の場合、変位振幅 u (cm) と振動レベル VL (dB) との間に次の理論的な関係がある。

$$\text{水平方向: } VL_H = 20 \log_{10} \left(\frac{U_H}{\sqrt{2}} \times 10^3 \right) + 67 \quad (6.1)$$

$$\text{鉛直方向: } VL_V = 20 \log_{10} \left(\frac{U_V}{\sqrt{2}} \times 10^3 \right) + 76 \quad (6.2)$$

したがって、同程度の振幅であれば、鉛直方向振動の方が振動レベルは大きくなる。

(2) 敷地境界での許容振動レベル

当該送風基礎の敷地境界での許容振動レベルは、式(6・3)で与えられる。

$$VL_{max} = 10 \log_{10} (10^{L_1/10} - 10^{L_2/10}) \quad (6 \cdot 3)$$

ここに、 L_1 ：許容振動レベル(60dB)

L_2 ：暗振動による振動レベル(50dB)

ゆえに、

$VL_{max} = 10 \log_{10} (10^{60/10} - 10^{50/10}) = 59.5\text{dB}$ が、敷地境界での許容振動レベルである。

(3) 敷地境界での許容振動レベルから規定される基礎振幅

a) 敷地境界での許容振幅

敷地境界での許容振動レベル $VL_{max} = 59.5\text{dB}$ の時、振幅は式(6・1)、(6・2)より次のように求まる。

水平方向： $U_{H2} = 5.96 \times 10^{-4} (\text{cm})$

鉛直方向： $U_{V2} = 2.11 \times 10^{-4} (\text{cm})$

b) 基礎端部での許容振幅

計測結果から求めた距離減衰式(5・2)、(5・3)より、基礎端部での許容振幅を求める。

水平方向： $U_{H1} = 5.96 \times 10^{-4} \times \sqrt{\frac{10.8}{4.0}} \times e^{0.167 \times (10.8 - 4.0)}$
 $= 30.5 \times 10^{-4} (\text{cm})$

鉛直方向： $U_{V1} = 2.11 \times 10^{-4} \times \sqrt{\frac{10.8}{4.0}} \times e^{0.031 \times (10.8 - 4.0)}$
 $= 4.3 \times 10^{-4} (\text{cm})$

一方、基礎軸受部では機械の上から許容振幅は $20 \times 10^{-4} (\text{cm})$ と規定されている (Table 1) ことから、基礎上での許容振幅は次の値となる。

水平方向：20.0 μ

鉛直方向：4.3 μ

6-3 マス案による検討

(1) 解析モデル

マス案解析モデルを Fig.12 に示す。この解析モデルは現状の機械配置で、基礎の重量を可能な限り大きくとったものである。

なお、解析にあたっては、加振力の軸芯レベルを現状のままとした場合と、軸芯レベルを150mm下げた場合の2ケースを考える。

(2) 解析結果

Table 5 より次のことが明らかである。

- ① 鉛直方向振幅が基礎上で38 μ 、140 μ となり、いずれのケースも許容値4.3 μ を大きく上回る。

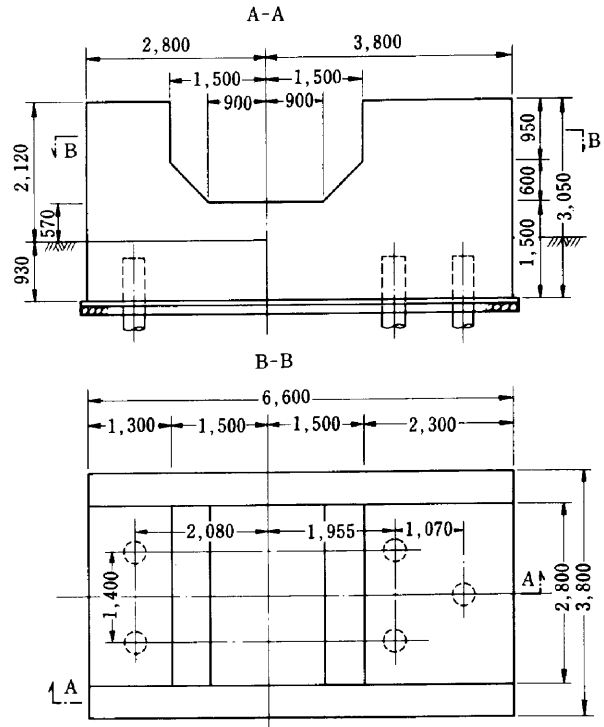


Fig.12 マス案

- ② 固有振動数も、いずれのケースも加振力振動数 $f = 20\text{Hz}$ に比べ十分に離すことができない。

6-4 バネ案による検討

地盤のバネ定数を上げる方法には地盤改良工法や、基礎底面を広げる方法も考えられる。しかし、地盤改良工法では、改良範囲の決定に不明確さがあること、また、基礎底面を広げる方法は、既存建屋内施工という条件から採用することができない。

したがって、バネ定数を上げる方法としてくいを多数打設する方法を考える。

バネ定数は、3-3(2)の種々の算定式から求め、次の値を採用する。

水平バネ：170(tf/cm)

鉛直バネ：520(tf/cm)

このバネ定数は、一般構造物の安定計算に使用される値に比べ相当大きい。

しかし、一般構造物の常時、地震時等の変位は数 mm から数 cm であるのに対し、機械振動による変化は μ 単位であり、地盤の弾性係数が非線形であることからすれば、十分考えられることである。

(1) 解析モデル

バネ案解析のモデルを Fig.13 に示す。このモデルは、計測結果から、振動の大きな要因がロッキングであることを考慮し、建屋内での可能な基礎幅で、くいを打設し、その位置をファン軸芯から可能な限り離れたもの

Table5 マス案の振動解析結果

| 軸芯レベル | バネ値 | | | | | f_y (Hz) | | | f_z (Hz) | | | 片振幅 | |
|------------|--|--|--|--|--|------------|------|------|------------|------|------|-----------------|-----------------|
| | K_x ($\times 10^5 \text{tf/m}$) | K_y ($\times 10^5 \text{tf/m}$) | K_z ($\times 10^5 \text{tf/m}$) | K_{yz} ($\times 10^5 \text{tf}\cdot\text{m/rad}$) | K_{zx} ($\times 10^5 \text{tf}\cdot\text{m/rad}$) | 1次 | 並進 | 2次 | 1次 | 並進 | 2次 | a_y (μ) | a_z (μ) |
| ±0 (現状) | 0.92 | 1.28 | 1.88 | 7.00 | 6.00 | 12.3 | 15.8 | 22.3 | 13.1 | 19.1 | 25.3 | 9.6 | 38.2 |
| -150 | 0.92 | 1.28 | 1.88 | 7.00 | 6.00 | 13.2 | 16.7 | 21.2 | 14.0 | 20.3 | 24.3 | 13.4 | 14.0 |

Table6 バネ案の振動解析結果

| 軸芯レベル | バネ値 | | | | | f_y (Hz) | | | f_z (Hz) | | | 片振幅 | |
|------------|--|--|--|--|--|------------|------|------|------------|------|------|-----------------|-----------------|
| | K_x ($\times 10^5 \text{tf/m}$) | K_y ($\times 10^5 \text{tf/m}$) | K_z ($\times 10^5 \text{tf/m}$) | K_{yz} ($\times 10^5 \text{tf}\cdot\text{m/rad}$) | K_{zx} ($\times 10^5 \text{tf}\cdot\text{m/rad}$) | 1次 | 並進 | 2次 | 1次 | 並進 | 2次 | a_y (μ) | a_z (μ) |
| ±0 (現状) | 4.76 | 4.76 | 14.6 | 16.4 | 64.5 | 28.2 | 40.9 | 44.7 | 29.1 | 71.6 | 75.8 | 5.2 | 4.9 |
| -150 | 4.76 | 4.76 | 14.6 | 16.4 | 64.5 | 29.7 | 41.6 | 45.4 | 30.7 | 72.9 | 77.0 | 4.5 | 4.3 |

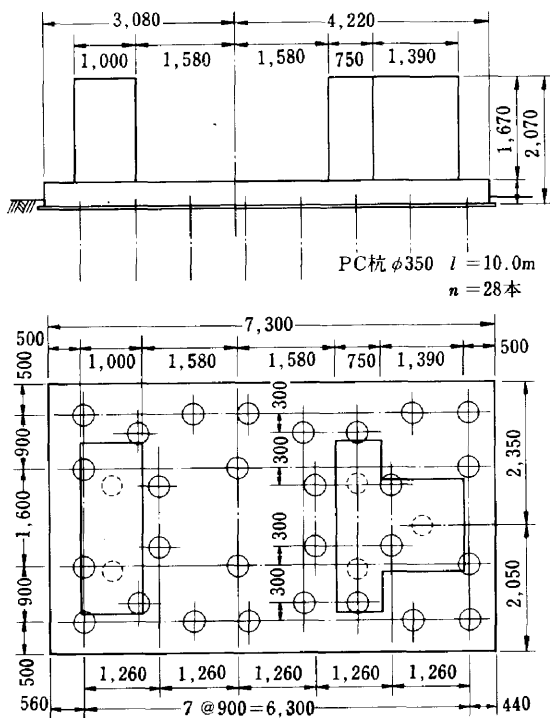


Fig.13 バネ案解析モデル

である。

なお、解析にあたって、マス案と同様、軸芯レベルを現状の場合と、150mm下げた場合の2ケースを考える。

(2) 解析結果

解析結果を Table 6 に示す。

Table 6 より次のことが明らかである。

- ① 軸芯レベルを現状のままとした場合では鉛直方向の許容振幅 4.3μ を満足することができない。
- ② 軸芯レベルを150mm下げた場合にはじめて許容振幅を満足することができ、固有振動数比も大きくすることができる。

6-5 改造案の選定

以上の検討より許容振幅条件を満足する改造案としてバネ案(軸芯レベルを150mm下げる)を採用する。

6-6 改造後の計測結果

改造後に実施された敷地境界上での振動計測結果は、次のとおりである。

- (1) 全機稼動による振動レベルは、許容値60dBに對

し、80%レンジの上端値で58dBとなり、10dB以上の低減をみた。

- (2) 改造基礎単独による振動レベルは57dBであり、設計値59.5dBに近いとともに、許容値を満足している。

これらのことから、防振効果が確認できる。

§7. おわりに

本報告で対象とした機械基礎は、振動解析で最も基本的な、剛体基礎の定常振動としての解析が適用できるものである。しかし、理論と実測のギャップも大きいことがわかり、基礎改造の検討に際し、以下の新しい試みを行った。

- ① 理論と計測の結果を生かし、実証的な効果をあげた。
- ② くいを多数打設した基礎において、ロッキング現象に対する防振効果を確認できた。

なお、上記の②に関しては、完成された理論を旨として今後の検討が必要であると考えます。また、振動計測は技術研究所振動グループの方々の協力によって行なわれた。記して深謝の意を表します。