

3 トン エヤ ハンマの防振基礎の振動

野坂 弥蔵・林 隆一

Yazo NOZAKA and Ryuichi HAYASHI
Vibration of Independent Foundation of 3-ton
Pneumatic Stamp Hammer

Abstract : In this paper we deal with the vibration characteristics of the independent foundation of 3-ton pneumatic stamp hammer. The foundation made by KIKUSUI FORGING COMPANY is consisted of a reinforced concrete block which supports the hammer and also is supported by isolators having 18 pneumatic springs as the resilient load-carrying means, and 24 leaf springs as the resilient load-carrying and damping means.

1. 結 言

鍛造機械用防振装置としては、盤木、防振ゴム、金属重ね板ばね、空気ばね、浮基礎などが用いられる。K社では、固定基礎の上に樗の盤木、その上に防振ゴムを敷き、更にその上に機体を載せて作業したら 5dB 程度の防振効果はあったが、廃油、廃水の流れ込みやスケールの入り込みのため、9ヶ月後には機体が傾き徹去せざるを得なくなった。そこで今回新たに鉄筋コンクリート製重量 204 ton の固定基礎を作り、その上に1個当り耐圧 5 ton の重ね板ばね24個と、1個当り耐圧 13 ton の空気ばね18個とを並列に並べ、その上に鉄骨コンクリート製重量 126 ton の中基礎 (SUSPENDED FOUNDATION)⁽³⁾ を載せ、中基礎の上に松板と樗の角材を並べてアスファルトで固めた盤木を置き、盤木の上に重量 110 ton のエヤスタンプハンマを取付けた。このハンマはアンビルとフレームの部分（この部分を以下単に機体と呼ぶことにする）は重量 107 ton で、落下するハンマの重量が 3 ton である。作業中の機体の横揺れ防止のため、ローラとコイルばねで構成される制振機を中基礎に取付け、そのローラが固定基礎の側壁に当るようになっている。固定基礎はU字形をしており、底面の寸法は 6.6m×6m で、側面の高さは 4.5m、側面の厚さは 40 cm あり、その上端が作業床面と同じ高さになっているから、底面は床面から 4.5m 下の地盤に据付けられていることになる。

この基礎の特色は、(a)ばねの部分にスケールや油が入り込まないように機体の裾をスカート状に覆う防塵装置と、(b)空気ばねと重ね板ばねに荷重を分担させることによって空気ばねの防振性と重ね板ばねの減衰性を組合せた防振装置である。空気ばねだけで防振した例はあるが⁽¹⁾、空気ばねだけでは、ハンマの打撃によって生ずる上下方向の自由振動が長く続いて作業性を悪くし、また機体の横揺れが大きい欠点があるので、中央部に空気ばねを、周辺部に重ね板ばねを配置することによって、自由振動の減衰と横揺れの防止とを狙ったわけである。このような装置の実用例が見当たらないので、(a)空気ばねの内圧は何気圧が最適か、(b)中基礎の重量を 126 ton に設計したが、それは作業性、鍛造効果、および防振効果から見て適当であったかどうかなど、明らかにしておかなければならない問題がある。本報告は、これらの問題に答えるために行った解析ならびに測定結果について述べたものである。

2. 解 析

図1はエヤハンマと防振基礎の略図で、図2はそれを上下方向の振動系にモデル化した図である。図2の m_1 、 m_2 、 m_3 はハンマと機体、中基礎、固定基礎の質量で $m_1 = m' + m''$ である。ここで m' はハンマの、 m'' は機体の質量である。重力の加速度 980 cm/sec^2 を g で表わすと、これらの重量は $m'g = 3$ 、 $m''g = 107$ 、 $m_1g = 110$ 、 $m_2g = 126$ 、 $m_3g = 204$ であった（単位は ton）。また k_1 、 k_2 、 k_3 は盤木、空気ばね+重ね板ばね、地盤を

* 島根大学教育学部技術科機械研究室

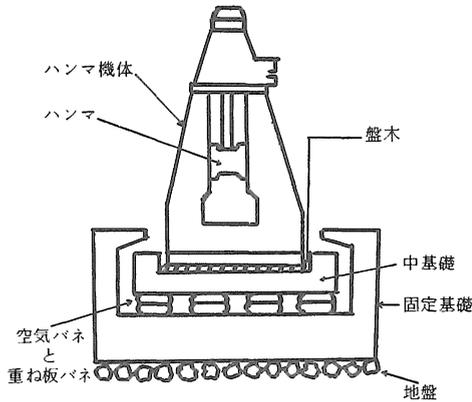


図1 ハンマーと防振基礎

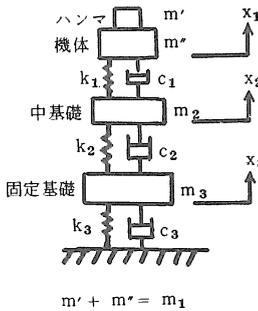


図2 図一の振動モデル

いずれも線形ばねと仮定した時のばね定数で単位は ton/cm である。C₁, C₂, C₃ は、盤木、空気ばね+重ね板ばね、および地盤の減衰をいずれも粘性減衰と仮定した時の粘性係数で単位は ton・sec/cm である。

2.1 減衰のない1自由度系と見た場合

防振上、k₂ は k₁ や k₂ に比べて小さくする。そこで先ず C₁=C₂=C₃=0, k₁=∞, k₂=∞ の場合を考えることにすると、図2は図3のような1自由度系になる。その固有角振動数を ω₁ radian/sec とすると、

$$\omega_1^2 = \frac{k_2}{m_1 + m_2} \quad \dots\dots(1)$$

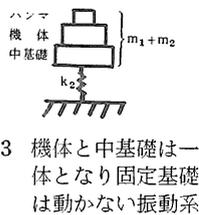


図3 機体と中基礎は一体となり固定基礎は動かない振動系

2.2 減衰のない2自由度系と見た場合

2.2.1 k₃=∞ の場合

図2で、C₁=C₂=C₃=0, k₃=∞ とすると図4の2自由度系となる。m₁, m₂ の変位を x₁, x₂ とすると運動

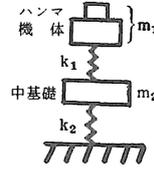


図4 固定基礎は動かない振動系

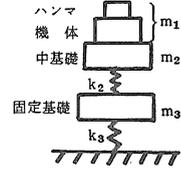


図5 機体と中基礎が一体となった振動系

方程式として

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 - k_1 x_2 = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_2 - k_1 x_1 = 0 \end{cases}$$

が得られる。x₁=A₁ sin ωt, x₂=A₂ sin ωt とおいて上式へ代入し振動数方程式を求めると

$$\omega^4 - \left(\frac{k_1}{m_1} + \frac{k_1 + k_2}{m_2} \right) \omega^2 + \frac{k_1 k_2}{m_1 m_2} = 0 \quad \dots\dots(2)$$

この方程式の2根を ω₁², ω₂² とすると、根と係数の関係から

$$\omega_1^2 \cdot \omega_2^2 = \frac{k_1 k_2}{m_1 m_2} \quad \dots\dots(3)$$

ところで、この系で k₁=∞ とすれば図3の系になるから図3は図4を近似したものと考えられる。そこで式(2)の根 ω₁² の近似値は式(1)で与えられると仮定して式(1)の ω₁² の値を式(3)へ代入し、ω₂² の近似値を求めると

$$\omega_2^2 = \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \cdot k_1 \quad \dots\dots(4)$$

2.2.2 k₁=∞ の場合

図2で、C₁=C₂=C₃=0, k₁=∞ とすれば、図5の2自由度系となる。この系の固有角振動数を ω₂, ω₃ とすると、2.2.1の場合と同様に

$$\omega_2^2 \cdot \omega_3^2 = \frac{k_2 k_3}{(m_1 + m_2) \cdot m_3} \quad \dots\dots(5)$$

が得られる。ところでこの系で k₃=∞ とすると図3の系になるから式(5)の ω₂² の近似値は式(4)で与えられると仮定して式(4)の ω₂² を式(5)へ代入し ω₃² の近似値を求めると

$$\omega_3^2 = \frac{k_3}{m_3} \quad \dots\dots(6)$$

2.3 減衰のない3自由度系と見た場合

図2で C₁=C₂=C₃=0 とし、ハンマ機体、中基礎、固

定基礎の変位をそれぞれ x_1, x_2, x_3 とすると運動方程式として

$$\begin{cases} m_1\ddot{x}_1 + k_1x_1 - k_1x_2 = 0 \\ m_2\ddot{x}_2 + (k_1 + k_2)x_2 - k_1x_1 - k_2x_3 = 0 \\ m_3\ddot{x}_3 + (k_2 + k_3)x_3 - k_2x_2 = 0 \end{cases} \dots\dots(7)$$

が得られる。 $x_1 = A_1 \sin \omega t, x_2 = A_2 \sin \omega t, x_3 = A_3 \sin \omega t$ とおいて(7)へ代入し、振動数方程式と振幅の比を求めると

$$\begin{aligned} \omega^6 - \left(\frac{k_1}{m_1} + \frac{k_1 + k_2}{m_2} + \frac{k_2 + k_3}{m_3} \right) \omega^4 \\ + \left(\frac{k_1 k_2}{m_1 m_2} + \frac{k_1 k_2 + k_2 k_3 + k_3 k_1}{m_2 m_3} + \frac{k_1 k_2 + k_1 k_3}{m_3 m_1} \right) \omega^2 \\ - \frac{k_1 k_2 k_3}{m_1 m_2 m_3} = 0 \end{aligned} \dots\dots(8)$$

$$A_2 = \frac{\frac{k_1}{m_1} - \omega^2}{\frac{k_1}{m_1}} \cdot A_1 \dots\dots(9)$$

$$A_3 = \frac{\frac{k_2}{m_3}}{\frac{k_2 + k_3}{m_3} - \omega^2} \cdot A_2 \dots\dots(10)$$

となる。1例として $m_1 g = 110, m_2 g = 126, m_3 g = 204, k_1 = 40000, k_2 = 100, k_3 = 120000$ の場合、 $x_1(0) = 250$ mm/sec, $x_1(0) = x_2(0) = x_3(0) = x_2(0) = x_3(0) = 0$ という初期条件で式(7)の解を求め、 $\omega_i = 2\pi f_i$ ($i = 1, 2, 3$) で表わすと、

$$\begin{cases} x_1 = 5.7 \sin(2\pi \times 3.2t) - 2.4 \times 10^{-5} \sin(2\pi \times 121t) \\ \quad + 0.16 \sin(2\pi \times 130t) \\ x_2 = 5.7 \sin(2\pi \times 3.2t) + 1.5 \times 10^{-5} \sin(2\pi \times 121t) \\ \quad - 0.14 \sin(2\pi \times 130t) \\ x_3 = 4.8 \times 10^{-3} \sin(2\pi \times 3.2t) - 9.4 \times 10^{-4} \\ \quad \sin(2\pi \times 121t) + 7.5 \times 10^{-4} \sin(2\pi \times 130t) \end{cases} \dots\dots(11)$$

また加速度は

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 = -238 \sin(2\pi \times 3.2t) + 1.4 \sin(2\pi \times 121t) \\ \quad - 10897 \sin(2\pi \times 130t) \\ \ddot{x}_2 = -237 \sin(2\pi \times 3.2t) - 0.85 \sin(2\pi \times 121t) \\ \quad + 9524 \sin(2\pi \times 130t) \\ \ddot{x}_3 = -0.2 \sin(2\pi \times 3.2t) + 54 \sin(2\pi \times 121t) \\ \quad - 50 \sin(2\pi \times 130t) \end{cases} \dots\dots(12)$$

式(11), (12)から次のことが分る。

(a) x_1 と x_2 の主成分は振動数 $f_1 = 3.2$ Hz の成分である。また x_1, x_2 の主成分の大きさはほぼ等しい。

(b) \ddot{x}_1 と \ddot{x}_2 の主成分は振動数 f_2 の成分である。(上の数値例では $f_2 = 130$ Hz)

(c) \ddot{x}_3 では、 f_1 成分は極めて小さく、 f_2, f_3 成分は同程度の大きさであるが、 $f_3 < f_2$ の時は f_3 成分、 $f_3 > f_2$ の時は f_2 成分の方が少し大きい。(例では $f_3 = 121$ Hz)

2.3.1 k_2 の大きさが振動数や振幅に及ぼす影響

空気ばねと板ばねの合成ばね定数 k_2 が振動特性にどのように影響するかを見るために、 k_2 以下の定数は2.3の場合と同じにし、 k_2 を色々変えて振動数 f_1, f_2, f_3 や変位 x_1, x_2, x_3 , 加速度 $\ddot{x}_1, \ddot{x}_2, \ddot{x}_3$ の主成分振幅を式(8), (9), (10)を使って計算した結果を図6と7に示す。これから次のことが分る。

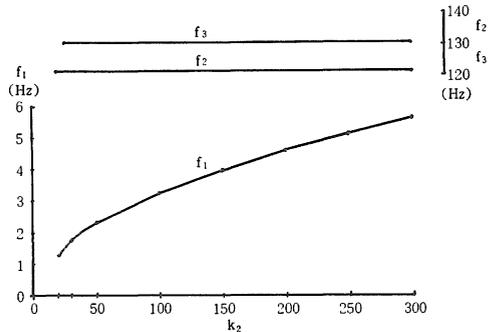


図6 空気ばねと重ね板ばねを並列したばねのばね定数 k_2 と、1次、2次、3次の固有振動数の関係

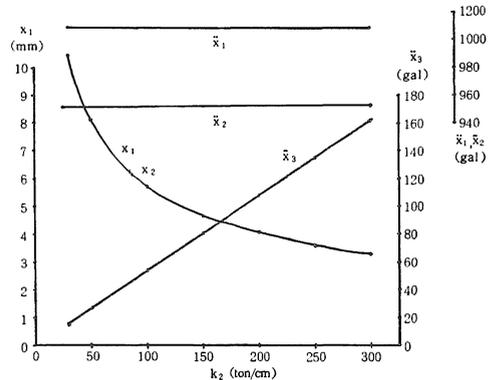


図7 k_2 と振幅の関係

(d) 式(8)を解いて求めた f_1, f_2, f_3 の値(図6)は、式(1), (4), (6)から計算されるその近似値とほぼ等しい。従って近似式(1), (4), (6)は振動数に関しては正しい値に

殆んど近い値を与える。

(e) \ddot{x}_1 と \ddot{x}_2 の主成分の振幅は k_2 の影響を殆んど受けない。

(f) x_1 と x_2 の主成分は k_2 が小さい程大きくなる。

(f) \ddot{x}_3 の主成分は k_2 と正比例して大きくなる。

2.3.2 k_1 の大きさが振動数や振幅に及ぼす影響

盤木のばね定数 k_1 が振動特性にどのように影響するかを見るために、 k_1 以外の定数は 2.3 の例と同じ値にし、 k_1 の値を色々変化させて、振動数 f_1, f_2, f_3 と、固定基礎の加速度 \ddot{x}_3 の主成分の振幅とを式(8), (9), (10) から計算した結果を図 8 に示す。これによると

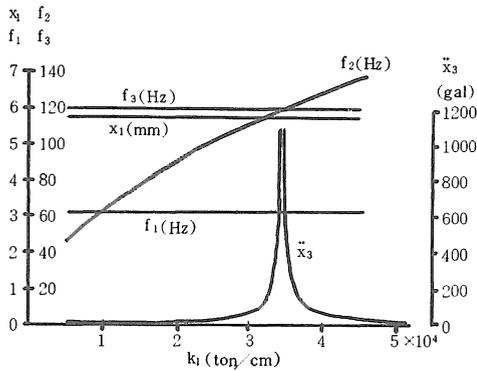


図 8 盤木のばね定数 k_1 の影響

(h) f_1, f_3 は殆んど一定であるが、 f_2 は k_1 と共に増す。

(i) $f_2 = f_3$ となるような k_1 の時に \ddot{x}_3 の f_2 および f_3 成分は非常に大きくなる。これは図 5 の 2 自由度系の共振点の 1 つが $f_3 = f_2$ の時に発生すること、に対応している。従って固定基礎 m_3 と k_3 の系は、 $(m_1 + m_2)$ と k_2 の系とは独立な 1 自由度系であって、 k_2 を介して振動数 f_2 で加振されるものと考えてよい。

2.3.3 m_2 の大きさが振動数や振幅に及ぼす影響

中基礎の質量 m_2 が振動特性にどのような影響を及ぼすかを見るために、 $k_1 = 35000$ 以外の定数は 2.3 の例と同じ値を使って、 m_2 に対する f_1, f_2, f_3 と x_1 および \ddot{x}_3 の主成分を描いたのが図 9 である。これによると、

(j) f_1 と f_2 は m_2 が大きくなる程小さくなるが f_3 は変わらない。このことは f_1, f_2, f_3 の近似値が式(1), (4), (6)で与えられることから当然である。

(k) x_1 の主成分は m_2 が増すと減るが、その減りは僅かである。

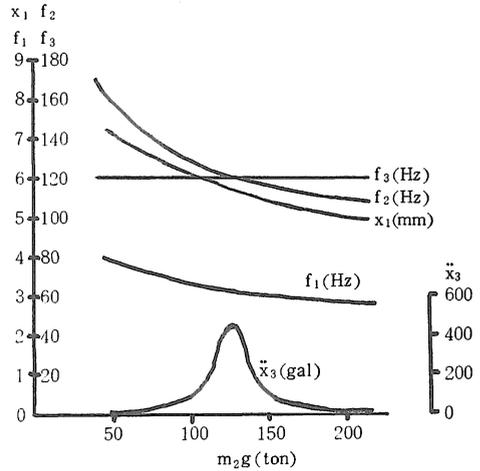


図 9 中基礎の質量 m_2 の影響

(l) \ddot{x}_3 の f_2, f_3 の成分は $f_2 = f_3$ の時に大きくなる。

2.3.4 k_3 の大きさが振動数や振幅に及ぼす影響

地盤のばね定数 k_3 の影響は、2.3.2 で述べた k_1 の場合と似ているので図を省略し結果だけ記すと、

(m) f_1, f_2 は殆んど一定であるが f_3 は k_3 と共に増す。その理由は式(1), (4), (6)から明らかである。

(n) $f_2 = f_3$ となるような k_3 の時に \ddot{x}_3 の f_2, f_3 成分は非常に大きくなる。

2.4 減衰のある 3 自由度系と見た場合

図 2 の系に対する運動方程式は

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = -k_1(x_1 - x_2) - C_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \\ m_2 \ddot{x}_2 = k_1(x_1 - x_2) + C_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_2(x_2 - x_3) \\ \quad - C_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) \\ m_3 \ddot{x}_3 = k_2(x_2 - x_3) + C_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - k_3 x_3 - C_3 \dot{x}_3 \end{cases} \dots\dots(13)$$

となる。これを図 10 のようなアナログ計算機回路に組んで解いた結果の 1 例を図 11 に示す。この例では時間係数 $\alpha = 135$ を使い、

$$\begin{aligned} \frac{k_1}{\alpha^2 m_1} &= 18 & \frac{k_1}{\alpha^2 m_2} &= 18 & \frac{k_2}{\alpha^2 m_2} &= 0.08 \\ \frac{k_2}{\alpha^2 m_3} &= 0.05 & \frac{k_3}{\alpha^2 m_3} &= 40 \\ \frac{C_1}{\alpha m_1} &= 0.08 & \frac{C_1}{\alpha m_2} &= 0.08 & \frac{C_2}{\alpha m_2} &= 0.05 \\ \frac{C_2}{\alpha m_3} &= 0.02 & \frac{C_3}{\alpha m_3} &= 0.5 \end{aligned}$$

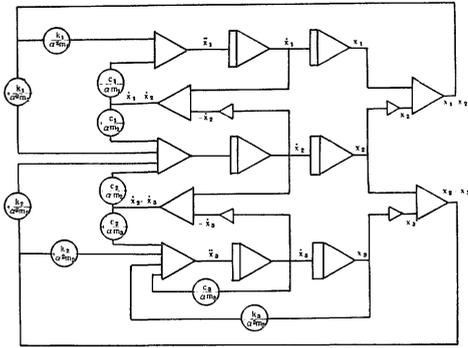


図10 アナログ計算機回路

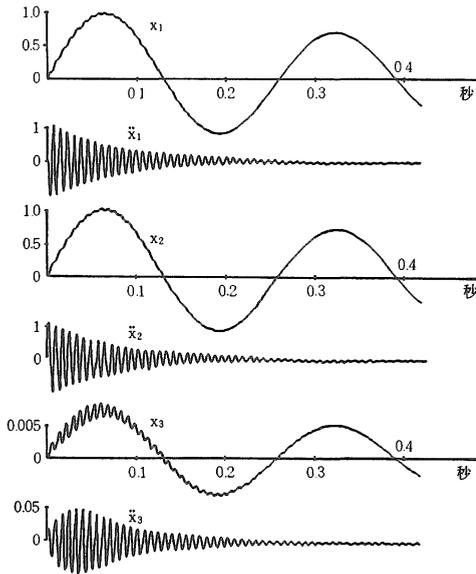


図11 式(13)のアナコンによる解

としている。これは

$$m_1g=110, m_2g=126, m_3g=204, k_1=36822, \\ k_2=187.5, k_3=151751 \text{ としたことに相当する。}$$

図11を見ると、2.3 で述べた特徴(a), (b), (c)がよく表われている。また \ddot{x}_3 が唸りに似た波形を示すのは、2次と3次の振動数 f_2 と f_3 の差、ならびに振幅の差が小さいためである。

3. 測定結果

緒言に記したK社の防振装置について8月下旬と2月中旬に各1日づつ測定した。その際、 $m_1, m_2, m_3, k_1, k_2, k_3$ の値はすでに定まっているので、空気ばねへ供給する空気圧を2~4.5 kg/cm²の範囲内で変化させ、その都

度、機体の変位 x_1 を差動トランスで、中基礎の加速度 \ddot{x}_2 を抵抗線形20G用加速度変換器で、固定基礎の加速度 \ddot{x}_3 を抵抗線形2G用加速度変換器または公害測定用振動計で測定した。つまり2.3.1に記したような k_2 の影響を測定したことになる。

測定結果全般について云えば、8月のものと2月のものとは可成り相違していた。例えば2月の場合には \ddot{x}_2 の中に f_1 成分が表われたこと、 \ddot{x}_2 や \ddot{x}_3 に高振動数のノイズが多かったことなどである。その原因の一つは、ハンマと重ね板ばねに塗られている潤滑油の粘度が、夏と冬では大幅に異なったためと思われる。(測定の時は、被加工物を打撃するのではなく、ハンマを直接アンビル上に落下させて自由振動を発生させる方法を採用したので、2月の場合には油の粘度を下げるため石油ストーブで機体を温めながら実験せざるを得なかったほどである)

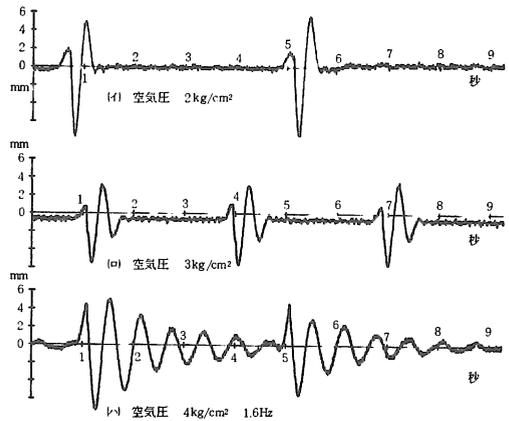


図12 ハンマ機体の変位 x_1

図12の(i), (ii), (iii)は2月に測定したもので空気ばねへの供給圧が2, 3, 4 kg/cm²の場合の機体変位 x_1 を示す。供給圧が高い程減衰が悪くなっているのは、圧が高いと空気ばねの高さが高くなり、殆んどの荷重を空気ばねが支えるため重ね板ばねの減衰作用が減る結果であろう。

解析結果から見れば、空気圧が増せば k_2 は小さくなり、 x_1 は大きくなる筈である。従って2 kg/cm²の場合の(i)は、3 kg/cm²の場合の(ii)より小さい筈であるが、逆に大きくなっている。これは、ハンマの落下速度が、操作する人の手加減で大きく変るためと思われる。

また、どの波形を見てもハンマがアンビルに衝突する直前に機体が上方へ動いているのは、2月の場合には熟練者が操作し、ハンマが落下する時に機体は上昇し鍛造効果を増すような打ち方をしたからである。

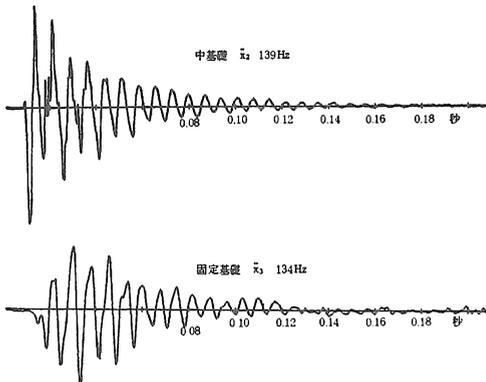


図13 加速度波形の1例 (空気圧 2.5 kg/cm²)

図13(イ)、(ロ)は8月に測定したもので、空気圧 2.5 kg/cm² の場合の中基礎加速度 \ddot{x}_2 と固定基礎加速度 \ddot{x}_3 である。図11のアナコン解とよく似ている。

これらの測定結果をまとめると次のようになる。

(1) ハンマ をアンビルに衝突させると、機体と中基礎は振動数 $f_1=1.6\sim 4$ Hz、最大片振幅 5~8mm の減衰自由振動をする。この振動は、空気ばねの圧力が 3~3.5 kg/cm² 以下では速に減衰するが 4 kg/cm² になると減衰が悪くなり約 5 秒位続く。

(2) 中基礎の加速度 \ddot{x}_2 には振動数 110~140 Hz の f_2 成分が顕著であるが、その成分が減衰した後に f_1 成分も現われることがある。

(3) 固定基礎の加速度 \ddot{x}_3 には振動数 110~140 Hz の f_2, f_3 成分が顕著であるが、その振幅は、空気ばねの空気圧を上げるほど小さくなる。例えば空気圧 3 kg/cm² の時と 4 kg/cm² の時を比較すると、前者が 40 dB、後者が 18 dB であった。

4. 結 論

(1) 盤木、空気ばね+重ね板ばね、および地盤それぞれのばね定数 k_1, k_2, k_3 の値は不明であるが、2. で記したように $k_1=40000$ ton/cm, $k_2=100$ ton/cm, $k_3=120000$ ton/cm と考えると、測定結果に近い変位や加速度が得られることから、ばね定数は大略上記の値前後と推定される。

(2) 空気ばねの圧力を上げると k_2 が下り、固定基礎の加速度 \ddot{x}_3 が下るので公害防止上有利であるが、逆に機体や中基礎の変位振幅が増したり、減衰が減ったりで作業性は悪くなる。測定結果から見ると、3~3.5 kg/cm² が適当と思われる。尚、沢潟によれば空気ばねの圧力を高めても鍛造効果には大きい影響はない。⁽²⁾

(3) 中基礎の役目は、(a)機体に剛性の大きい基礎を提供すること、(b)機体の実質の重心を下げることによって横方向の安定を増すこと、(c)機体の実質重量を増すことによって上下方向変位を小さくし鍛造効果を増すことである。 m_2 を大きくすることは(a), (b), (c)いずれにも有効ではあるが、図9からも分るように m_2 の増加による x_1 の減少は顕著とは云えないから無闇に大きくする必要はない。

(4) 図8で見るように、2次と3次の振動数が等しく $f_2=f_3$ となると、固定基礎の加速度 \ddot{x}_3 が非常に大きくなり振動公害を増す。式(4)と(6)によると、 $f_2=f_3$ となるのは

$$\frac{m_1+m_2}{m_1m_2} \cdot k_1 = \frac{k_3}{m_3} \quad \text{従って} \quad \frac{(m_1+m_2)m_3}{m_1m_2} = \frac{k_3}{k_1}$$

となる時である。設計時には m_1, m_2, m_3 の値は知れるが k_1, k_3 は求まり難い。これらの値を簡単に推定する方法の開発が望まれる。

謝 辞

測定に当って、差動トランス取付用治具を製作し測定に多大の助力をされた鳥取県工業試験場の金田所長と足森、柏木、西本の諸氏ならびに測定の機会を与えられ、休日にも出勤して協力していただいた協業組合菊水フォーシングの山林部長、勝部課長、中津主任、本田氏その他の方々に深く感謝いたします。また計算や波形の記録などは昭和54年度の教育方法等改善経費の一部で購入したマイコンで行ったことを付記して謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 日本鉄道車輛工業会：防振ゴム 現代工学社 (1975)
- (2) 沢潟作雄：機械基礎の設計と据付 丸善 (1970)
- (3) HARRIS AND CREDE：SHOCK AND VIBRATION HANDBOOK II 32-7 (1969)
- (4) 別府 淳：高速鍛造機の防振基礎の振動について 日本機械学会論文集 32巻 234号 194頁 (1966)