

# 衝撃荷重を受ける機械基礎-半無限体モデル系の動的応答

## DYNAMIC RESPONSE OF MACHINE FOUNDATION-MODEL HALF SPACE SYSTEM UNDER IMPACT FORCE

二井 義則\*

By Yoshinori NII

Vibration pollutions caused by factory machines like a forging hammer are still one of the social problems in Japan. On the design of the foundation for such shock producing machine, it is necessary to consider the radiated waves caused by foundation vibration. This paper investigates, from the point of view mentioned above, dynamic response of machine foundation under impact force and radiated waves from a foundation. For this purpose the experiments were carried out using the model half space made of the RTV silicone rubber. Also the approximate method to analyze the wave radiated from the foundation under impact force was presented and applicability of this method was investigated.

*Keywords: vibration pollution, forging hammer, machine foundation, Rayleigh wave*

### 1. ま え が き

機械が運転時に強力な加振力を発生する場合、周辺地盤中へ放射される振動が公害として問題となることがある。工場振動はその敷地境界における振動レベルで規制されるため、さらには、公害に対する一般認識や生活環境の向上もあって、近年機械基礎の設計においては周辺環境への振動の影響が考慮されている<sup>1)</sup>。また、従来機械基礎の設計においても、周辺構造物や精密機械などへの影響が必要に応じて考慮されてきた<sup>2)</sup>。

周辺地盤の動的応答を考慮した基礎設計においては、機械が発生する加振力や地盤のばね・減衰効果のほか、地盤の振動伝達特性の適切な評価が必要となる。しかしながら、地盤の振動伝達特性については現象の複雑さのため、単に振動の距離減衰傾向を現地における実測調査や蓄積されたデータから推定、把握するのが現状のようである。一方、上述のような状況に鑑み、地盤の振動伝達特性解明のための研究が数多く行われてきたが、これらを総括すれば、振動源近くの地表面上に基準点を設け、他地点と基準点との間の振動、波動の相対関係のみが議論され、振動源である基礎の振動と発生する地盤振動と

は別の問題として扱われてきた、といえよう。周辺地盤の動的応答を考慮した基礎設計においては、両者を総合、統一して扱うことが不可欠であり、基礎設計の過程で得られる基礎の動的応答が、結果として地盤振動にどのように結びつくのかを容易に推測可能とする、合理的で見通しのよい方法論が必要とされる。このような見地から著者はこれまでに、基礎から放射される定常振動の発生・伝搬現象を半無限体モデルを用いて実験的に検討し、あわせて基礎振動を入力とし、地盤振動を出力とする近似伝達関数を提示するとともに、その妥当性や適用性を調べてきた<sup>3)-5)</sup>。

ところで、工場による振動公害の発生源として問題視されるのは鍛造機械やプレス機械などのような、素形材加工時に強力な衝撃力を発生する機械である。とりわけ鍛造機械は発生する衝撃力が大きく、その力を基礎で受けるという構造上の特徴から振動公害の元凶とされている。動的応答量決定としての鍛造機械基礎の実用上の設計法はすでに確立されているといえる<sup>6)-9)</sup>が、衝撃力作用中の基礎の応答特性については、必ずしも明確にされていない。さらに、基礎の衝撃振動応答により地盤中へ放射される振動については数多くの調査例はある(たとえば文献10)~12))ものの、波動としての地盤振動がどのような特徴をもち、基礎の応答とどのように対応し

\* 正会員 工修 工業技術院機械技術研究所  
(〒305 茨城県新治郡桜村並木1-2)

ているのか、といった基本的な点すら明らかでない。

そこで本論文において、周辺地盤の動的応答を考慮した機械基礎の設計に資するため、鍛造機械のようなパルス状の衝撃力を発生する機械を想定し、機械基礎-地盤系の衝撃振動応答を、半無限体モデルを用いて調べた実験、検討結果について述べる。また、すでに得られている基礎-地盤間の振動の近似伝達関数<sup>3)</sup>などを用いた衝撃振動応答の近似解析法と結果を示し、実験結果の一部と比較することにより、近似解析法をこの種の問題に適用することの妥当性を調べる。

2. 実験方法

Fig. 1 に実験方法を示す。過渡信号で駆動される動電形加振器により、基礎に取り付けられた力検出器を垂直方向に打撃する。打撃部分はプラスチック製である。打撃により得られる衝撃力と、基礎もしくは半無限体モデルに取り付けた PU からの垂直方向の加速度信号をパーソナルコンピュータを中心としたシステムに取り込み、波形の解析、処理を行った。なお、公害振動は JIS C 1510 に規定される振動レベルで評価されるため、本システムに付録 A に述べる振動レベル算出機能をもたせた。ただしこの場合、Table 1 (b) に示す実規模の地盤を想定した。

Table 1 (a) に、実験に使用した半無限体モデル媒質の物理的性質を示す<sup>3)</sup>。半無限体モデルは市販の RTV 型シリコンゴムを改良し、容器中に 1.4 m×1.7 m×0.4 m (高) として均質、一様に作製した。媒質はゴム状物質であり、ポアソン比は 0.5 に非常に近い値をもつ。模型基礎の形状は、半径  $r_0$  が 3 cm の円形およびそれと底面が同じ面積の正方形とした。円形基礎については、PU などを取り付けた状態で質量  $m$  が 110, 185, 330 g の 3 種類を用意し、正方形基礎 ( $m=185$  g) を含め、Fig. 2 (a) に示すように半無限体モデル表面上に設置して実験を行った。埋設基礎 ( $r_0=3$  cm, 高さ  $H=3$  cm,  $m=185$  g) については、図 (b), (c) に示すとおりである。以後 Fig. 2 (a), (b), (c) に示す基礎の設置状態をおのおの、A 型、E 型、F 型とよぶこととする。なお埋設基礎については、既設の半無限体モデルの必要部分を概略図示の点線のように切り取り、新たに同種のゴム材料を充填して基礎を設置した。基礎周辺部の横波速度は 11.0 m/s で、半無限体モデルのそれより若干小さな値となった。E 型の場合、基礎側面と半無限体モデル媒質は接着状態と考えてよい。F 型の場合には、E 型の実験終了後、側面から 2 mm 前後の部分を取り取って実験を行った。A 型の基礎は黄銅もしくは硬質アルミニウム製である。E, F 型基礎は無機質のフィラーを含むフェノール樹脂製であり、比重約 1.8 である。

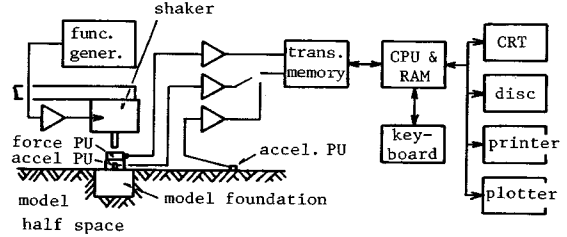


Fig. 1 Method of experiments.

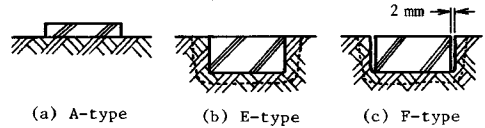


Fig. 2 Foundation on the model half space.

Table 1 Physical properties of the model half space (a), hypothetic ground soil (b) and scale factor (c).

(a) 半無限体モデル			(b) 実規模地盤	
横波速度	$V_s$ (m/s)	11.3	$V_s$	113
レイリー波速度	$V_R$ (m/s)	10.8	$V_R$	108
ポアソン比	$\nu$	0.5	$\nu$	0.5
密度	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	0.98	$\rho$	1.3
減衰定数	$h$ (%)	3.1	$h$	3.1

(c) 相似比	
時間	×10
速度	×10
長さ	×100
力, 質量	×1.33×10 <sup>6</sup>
加速度	×1

なお、Table 1 (c) に示す相似比を仮定すれば、185 g の模型基礎は、1 トンの能力の型鍛造エアドロップハンマの機械および基礎の標準的総重量 (約 240 トン) に概略対応する。

3. 近似解析法

衝撃荷重に対する基礎および半無限体モデル表面の時刻歴応答は以下に述べる方法で求めた。衝撃力  $f(t)$  による基礎の加速度を  $w_0(t)$ 、基礎中心から  $r$  だけ離れた位置の波動加速度を  $w_r(t)$  とし、これらのフーリエ変換をおのおの、 $F(j\omega)$ 、 $W_0(j\omega)$ 、 $W_r(j\omega)$  とする。 $F(j\omega)$  と  $W_0(j\omega)$  は、式 (1), (2) の関係にあることを容易に示すことができる。

$$W_0(j\omega) = Y(j\omega)F(j\omega) \dots \dots \dots (1)$$

$$Y(j\omega) = \frac{1}{K_0 - ba_0^2 + K_a + ja_0 C_a} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $t$  = 時間、 $\omega$  = 角周波数、 $j = \sqrt{-1}$ 、 $G$  = 媒質のせん断剛性、 $\rho$  = 媒質の密度、であり、

$$\left. \begin{aligned} K_0 &= 4 r_0 G / (1 - \nu) \\ a_0 &= r_0 \omega / V_s \\ b &= \frac{1 - \nu}{4} \frac{m}{\rho r_0^2} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

$b$  は質量比である<sup>2)</sup>。式 (2) 中の  $K_a$ ,  $C_a$  は、地盤の複素剛性を  $Z(j\omega)$  とすると、

$$\left. \begin{aligned} Z(j\omega) &= K_0(K_a + ja_0C_a) \\ \text{の関係で規定される無次元量である。解析は、A型基礎の場合についてのみ行い、} & \\ K_a, C_a \text{ については } a_0 \text{ が } & \\ 8 \text{ 以下の領域における実測値}^{13)} \text{ の近似式である式 (4) と、} & \\ \text{一部比較のため } \nu = 0.5 \text{ における Veletsos ら}^{14)} \text{ の近似解である式 (5) を用いた。ただし、式 (5) は弾性解である。} & \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

$$\left. \begin{aligned} K_a &= 1 - 0.002 a_0 - 0.19 a_0^2 \\ C_a &= 2h/a_0 + 0.83 + 0.024 a_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

$W_0(j\omega)$  と  $W_r(j\omega)$  の間には、波動をレイリー波で代表させて得られる式 (6) の近似伝達関数がある<sup>3)</sup>。すなわち、 $H(j\omega) = W_r(j\omega)/W_0(j\omega)$  として、

$$H(j\omega) = \frac{4 r_0 L_z}{1 - \nu} \sqrt{\frac{\omega}{2 \pi V_R r}} \Phi \exp(-\alpha_R r) \cdot \exp(-j r \omega / V_R - j \pi / 4 + j \phi) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} \alpha_R &= \omega h / V_R \\ \phi &= \tan^{-1}(a_0 C_a / K_a) \\ \Phi &= 1 / (1 + 0.04 a_0^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

である。 $L_z$  は媒質が弾性体の場合ポアソン比  $\nu$  のみの関数であり、 $\nu = 0.5$  のとき、 $L_z = 0.1089$  である。詳細は文献3)を参照されたい。

式 (7) に示す  $\Phi$  は、 $\Phi$  を除いた式 (6) の絶対値を実験結果<sup>3)</sup>と比較して得られたものであり、Luco ら<sup>15)</sup>による far field displacement frequency factor  $R_v$  の絶対値を変位関数の絶対値  $f_0 (= 1 / \sqrt{K_a^2 + a_0^2 C_a^2})$  で割ったものに相当する。 $R_v$ ,  $f_0$  は  $a_0$  および  $\nu$  の関数であるが、Luco らの理論解析結果からみると、 $|R_v|$ ,  $f_0$  の  $a_0$  に対する傾向は  $\nu$  により大きな差はなく、したがって、 $|R_v|/f_0$  も  $\nu$  により大きく変化しないと考えられる。 $|R_v|/f_0$  の  $a_0$  に対する傾向は式 (7) に示す  $\Phi$  と大略合っており、 $\Phi$  は  $\nu$  に無関係に成立すると考えてもよさそうである。

さて、 $w_0(t)$  は、 $f(t)$  の測定値の離散フーリエスペクトル  $F(j\omega)$  が得られれば式 (1) の逆フーリエ変換から求まる。また、 $W_r(t)$  はさらに、

$$W_r(j\omega) = H(j\omega)W_0(j\omega) \dots\dots\dots (8)$$

の逆フーリエ変換から求められる。

4. 結果と考察

(1) 衝撃力の特性

Fig. 3 に打撃による衝撃力波形とそのスペクトルを示す。衝撃力は打撃の都度多少変動する。そのため、デー

タ処理の過程で衝撃力の最大値  $f_p$  をすべて 18.0 N に整理した。衝撃力  $f(t)$  は  $\sin^2(\omega t)$  の半周期に近い波形を示している。衝撃力作用時間は 0.4~0.5 ms である。衝撃力の力積は約 4 Nms である。鍛造機械による加工時に発生する衝撃力については、1/2~3 トンの能力のもので 4~6 ms 程度との報告<sup>16)</sup>がある。ただし、同報告<sup>16)</sup>では、衝撃力波形は被加工物の材質により差があるとし、必ずしも  $\sin^2(\omega t)$  のような波形にはならないようである。Table 1 に示す相似比でみると、Fig. 3 に示す衝撃力の特性は、実機のモデルとして概略妥当なものといえよう。この場合、本実験における衝撃力の最大値 18 N は、実機では約 24 MN に相当する。

(2) 基礎の衝撃振動応答

Fig. 3 に示す衝撃力に対する A 型基礎の加速度応答の例を、Fig. 4 (a), (b) に示す。(a) は測定結果、(b) は式 (4) を用いた式 (1) の逆フーリエ変換による計算値である。測定値と計算値はよく一致している。式 (4) は高周波域においても妥当なものであり、式 (1) の逆フーリエ変換により基礎の加速度応答を精度よく計算できることがわかる。なお、以下において基礎の加速度応答波形のうち、衝撃力作用中の部分を衝撃応答部、それ以後の自由減衰振動の部分を減衰振動部とよぶこととする。

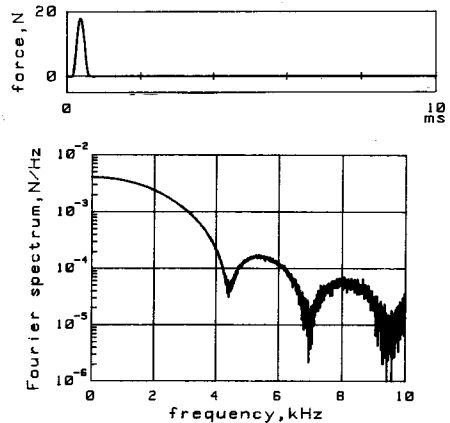


Fig. 3 Impact force and its spectrum.

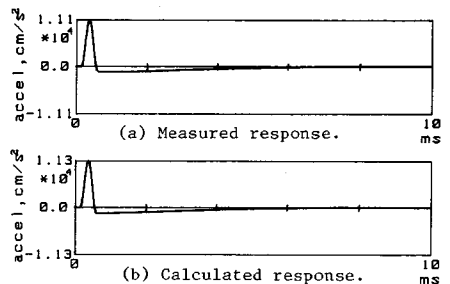


Fig. 4 Response of the foundation ( $m=110$  g).

基礎の衝撃応答部は、衝撃力波形と概略相似であり、ニュートンの運動の第2法則  $f = m\alpha$  ( $\alpha$  = 基礎の加速度) に従うようにみえる。そこで  $f_p = 18 \text{ N}$  として、基礎質量  $m$  に対する基礎の最大加速度  $\alpha_p$  を示したのが Fig. 5 である。F 型基礎の測定値は A 型と E 型の間にある。図中の実線は  $\alpha_p = f_p/m$  の関係を示し、鎖線、点線、一点鎖線はおのおの、 $K_a$ 、 $C_a$  として式 (4)、 $\nu = 0.5$ 、 $\nu = 1/3$  における Veletsos ら<sup>14)</sup> の近似解を用いて得た式 (1) の逆フーリエ変換による  $\alpha_p$  を示す。

A 型基礎の測定値は、式 (4) を用いた計算値とよく一致し、 $\nu = 0.5$  における Veletsos らの近似解である式 (5) を用いて得られた  $\alpha_p$  とほぼ一致する。 $\alpha_p = f_p/m$  の計算値と測定値の差は、半無限体モデルの複素剛性によるものであるが、式 (2)、(4) から明らかのように、 $K_a$  中の  $\alpha_0^2$  の係数の 0.19 が  $b$  に加算されるため、見掛け上基礎質量が大きくなるためと説明できる。すなわち、A 型基礎の場合の地盤の付加質量  $m_a$  は

$$m_a = \frac{4}{1-\nu} \rho r_0^3 \times 0.19$$

で与えられることを容易に示すことができるが、 $M = m + m_a$  として  $\alpha_p = f_p/M$  を求めると、Fig. 5 の点線とほぼ重なる。地盤の付加質量を適切に評価して運動の第2法則を適用することにより、 $\alpha_p$  を実用上十分な精度で求めることができることがわかる。なお、同図中で Veletsos らの  $\nu = 1/3$  における近似解を用いた、 $\alpha_p$  の計算値 (一点鎖線) は、実線とほぼ一致している。 $\nu = 1/3$  の場合、Veletsos らの近似解によれば、 $K_a$  は  $\alpha_0^2$  の項をもたない。したがってこの場合、地盤の付加質量を考慮する必要はなく、運動の第2法則から十分な精度で  $\alpha_p$  を推定できることがわかる。E 型基礎の  $\alpha_p$  の測定値は同一質量の A 型基礎のそれに比較して小さい。これは E 型基礎の付加質量が A 型基礎に比較して大きいためと説明できる。

ところで、鍛造機械の発生する衝撃力  $f(t)$  を実際に知ることは困難である。そこで一般に基礎の設計においては、2つの質量の衝突理論から、衝突直後の基礎の速度を求め、これを初期値として基礎の過渡応答が計算される<sup>6)~9)</sup>。この場合、地盤の複素剛性は無視されるが、以下において  $v_0$  を求めるにあたり複素剛性の影響を無視することの影響をみてみよう。

$f = m\alpha$  を、衝撃力作用時間内で積分すれば、 $v_0$  を打撃直後の基礎の速度、 $\Delta$  を力積として、

$$m v_0 = \Delta \dots \dots \dots (9)$$

なる関係が得られる。Fig. 6 は  $\Delta = 4.0 \text{ Nms}$  として、 $v_0$  と  $m$  の関係を示したものである。図中の記号は  $v_0 = \Delta/M$  の関係を示す 2 点鎖線のほかは、Fig. 5 のそれと同じにして示してある。Fig. 5 との比較から明らかなよ

うに、基本的には Fig. 5 でなされたのと同様の指摘がなされるが、地盤の付加質量を考慮した  $v_0 = \Delta/M$  の関係式と測定値には若干の差があることに注意したい。この差は基礎の運動により生じた地盤の反力によるものと考えられる。

(3) 半無限体モデルの衝撃振動応答

a) 波動の指向特性

Fig. 7 は A 型の円形基礎 ( $m = 185 \text{ g}$ ) から放射され

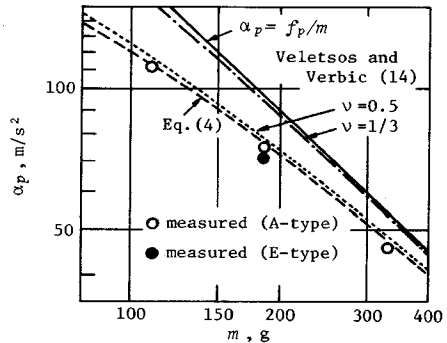


Fig. 5 Peak acceleration of foundation under impact force.

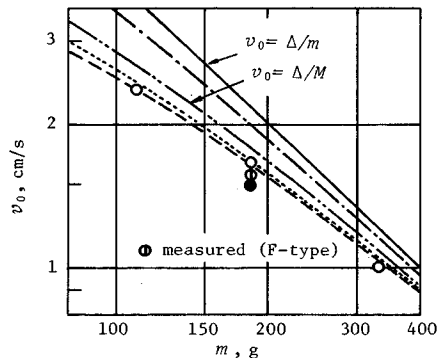


Fig. 6 Initial velocity of foundation.

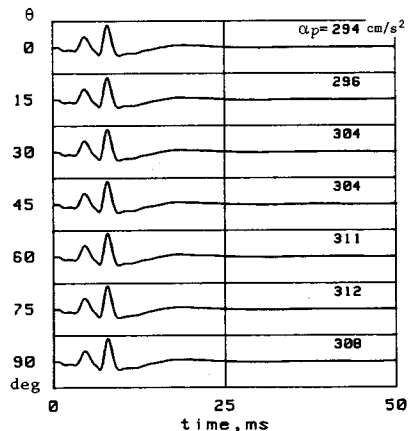


Fig. 7 Radiated waves for various directions from circular foundation ( $m = 185 \text{ g}$ , A-type).

る波動を、 $r=10\text{ cm}$ 、半無限体モデル表面の1/4平面内の $15^\circ$ の間隔で測定した結果である。図の左の数字は、ある方向を基準とした角度 $\theta$ 、右の数字は波動の加速度最大値 $\alpha_p(\text{cm/s}^2)$ である。波形、 $\alpha_p$ ともに方向によって大きな差はない。打撃により基礎が水平もしくは回転運動をすれば、放射される波動に指向性が現われるはずである。基礎はほぼ上下方向のみに運動していると考えてよい。

次に、正方形基礎から放射される波動を、同様にして求めたのが Fig. 8 (a) ( $r=10\text{ cm}$ )、(b) ( $r=50\text{ cm}$ )

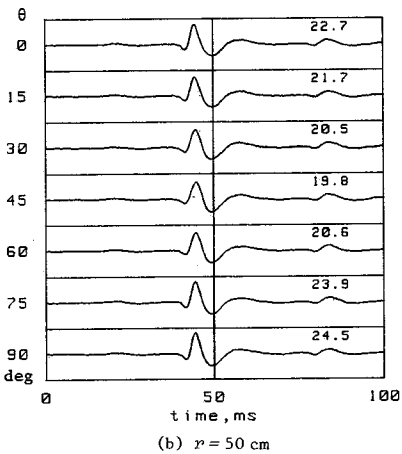
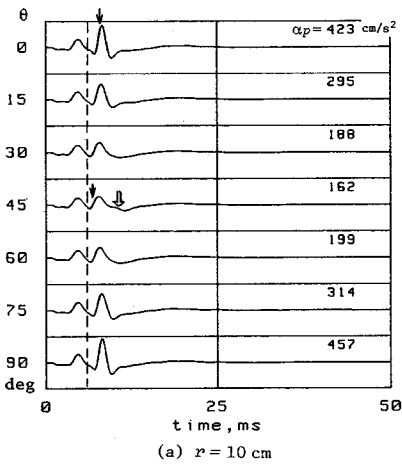


Fig. 8 Radiated waves from square foundation.

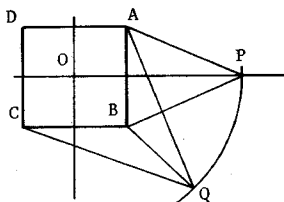


Fig. 9 Square foundation on the model half space.

である。 $\theta=0^\circ$  および  $90^\circ$  は基礎の辺に直交し、基礎中心を通る方向としている。 $r=10\text{ cm}$  の場合、Fig. 7と同様に2つの大きな山(以下便宜上、第1動、第2動とよぶ)が認められる。後述のように、これらは基礎の衝撃応答部に対応している。図(a)中の鎖線は打撃後約6msの時間を示すが、波動の様子はこの線の前後で大きく異なる。すなわち、6msまでは波動の波形、振幅、走時ともに方向によりほとんど変化しないのに対し、それ以後では大きく変化している。以下において、第2動とそれに続く部分の方向による違いについて考察する。

正方形基礎の場合、基礎底面下の地表における圧力分布は4端で集中して大きくなる<sup>17)</sup>。そこで Fig. 9 に示す系において、基礎の端点 A, B, C, D を波動の放射源と仮定し、まず  $\theta=0^\circ$  方向の点 P ( $OP=10\text{ cm}$ ) へ到達する波動を考える。波動速度を  $11\text{ m/s}$  とすると、Fig. 8 (a) で、 $\theta=0^\circ$  の ↓印の位置が AP および BP を伝搬してくる波動の到達時間である。実際のピークは若干遅れているが、ほぼ一致しているといえよう。次に、図示の  $r=10\text{ cm}$  の円周に沿って観測点 P を移動していくと、AP, BP 間に距離差が生じ、両方の経路からの波動の位相ずれのため、重ね合わせた波形はピーク値が小さく、かつ幅が広がると考えられる。図中の  $\theta=15^\circ, 30^\circ$  の波形はその傾向を明瞭に示している。 $\theta=45^\circ$  では、BQ 間を伝搬した波の到達時間を ↓印で示すが、これは第2動のピーク位置とは合っていない。なお、図中の ∩印の位置は AQ および CQ 間の伝搬による到達時間であり、その位置に波動の立上りが認められる。以上の検討から、正方形基礎の4端が第2動の主たる放射源と考えてよからう。また、第1動については、最大振幅および最大振幅を与える時間が方向により変化せず、あたかも無指向性の放射源が基礎中心にあるようにみえる。

Fig. 8 (b) に示す  $r=50\text{ cm}$  の場合、40~60ms の間の主要動は第2動とそれに続く部分に対応する。 $r=10\text{ cm}$  の場合に指摘された特徴は認められるものの、波動は無指向性に近い特性を示し、振幅は円形基礎のそれとほぼ一致する (Fig. 10 参照)。これは、 $r$  が大きい領域では、正方形基礎全体が点振動源として作用するため、と考えられる。なお、80~90ms に認められる成分は半無限体モデル底面からの反射波である。

b) 波動の伝搬特性

Fig. 10 は A 型基礎 ( $m=185\text{ g}$ ) から放射される波動の伝搬の様子を示している。ただし、図中の鎖線以後の部分は半無限体モデル底面からの反射波である。基礎近くの領域では、打撃とほとんど同時に到達する高速 ( $\approx 1\text{ km/s}$ ) の縦波のほか、振幅の大きい2つの山(前に第1動、第2動とよんだ)の移動が認められる。第1動、第2動ともに明らかに基礎の衝撃応答部に対応して

いる。

Fig. 11 (a), (b) にこれら2つの山のピークの走時(時間は衝撃力最大時から)と距離減衰を示す。●印は第1動, ○印は第2動を現わす。図(a)中の○印に沿う直線はレイリーの伝搬速度 10.8 m/s の勾配で描いたものであり, 遠方において卓越する波動がレイリー波であることがわかる。この直線は図の原点をマイナス側に外れており, 波動の見掛け上の放射源が基礎中心より観測点側にあることを示唆している。一方, 第1動については距離に対する減衰がかなり大きく, その存在は振動源近くの領域に限定されている。また, 移動速度が 24 m/s の走時の直線は原点を通っており, 第1動の放射源が基礎中心にあるように見える。正方形基礎からの第1動は無指向性に近いことから, あたかも基礎中心に放射源があると考えられたが, 上述の結果はこれとよく対応している。

ところで, 半無限弾性体表面を垂直方向に定常加振した場合に放射される弾性波の速度は,  $\nu=0.5$  の場合, 振動源の近く (near field) で見掛け上大きく変動することが知られている<sup>18)</sup>。付録Bに示すように, 実験結果は上述の理論解析結果を実証している。一方, Fig. 11に示される2つの波動の特性を定常的なものと仮定し, それらの振幅と位相差を適宜設定して重ね合わせ, 試行錯誤的に重ね合わせた波動の見掛け上の速度の変動傾向を調べてみると, 容易に Fig. A・2に示されるものと似た傾向の得られることを示すことができる。第1動の存在は, その移動速度がどの弾性波速度とも一致しないことから, 物理的に明確な裏付けのないものであるが, near fieldにおける定常振動の伝搬速度の変動傾向と密接に関係するようと思われる。

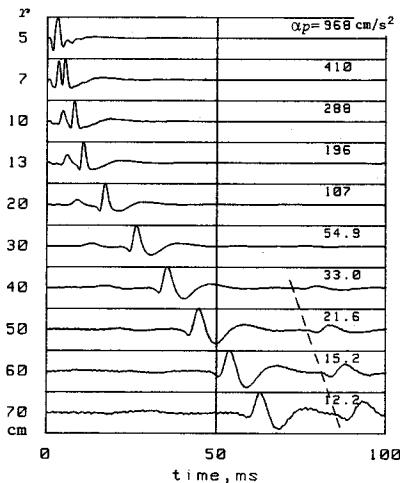
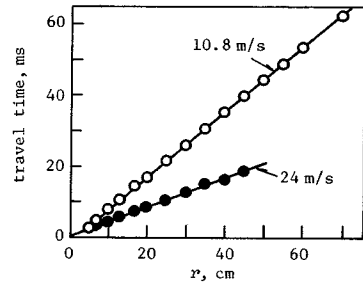
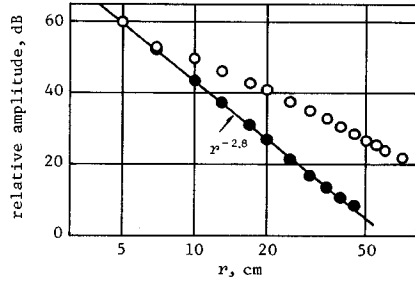


Fig. 10 Propagation of wave radiated from circular foundation ( $m=185$  g, A-type).



(a) Travel time of two peaks.



(b) Peak amplitude attenuation with distance.

Fig. 11 Travel time and peak amplitude attenuation with distance of the wave.

次に, 3. に述べた近似解法を用い, Fig. 10に示すのと同じ条件で伝搬する波動を計算したのが Fig. 12である。なお, 計算においては,  $K_a$ ,  $C_a$ として式(4)を用いたが,  $\nu=0.5$ に対する Veletsosら<sup>14)</sup>の近似解を用いても大差のない結果が得られた。Fig. 10, 12の比較から明らかなように, 計算結果は第1動を再現しておらず, また, 第1動が顕著に小さくなる領域で測定値と比較的よく一致している。たとえば,  $r=20$  cmでは第1動は十分小さく, 計算値と測定値は概略合っているとい

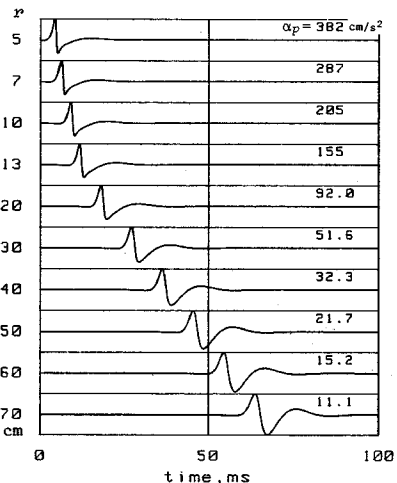


Fig. 12 Calculated Rayleigh wave propagation from foundation ( $m=185$  g, A-type).

えよう。  $r=20$  cm における卓越周波数は 100 Hz 程度であり、式 (6) を用いた近似解析法は波動の卓越周波数の概略 2 波長以上の領域で適用可能であるといえる。なお、Fig. 10, 12 から明らかなように、レイリー波は基礎の衝撃応答部と減衰振動部に明確に対応する波形を

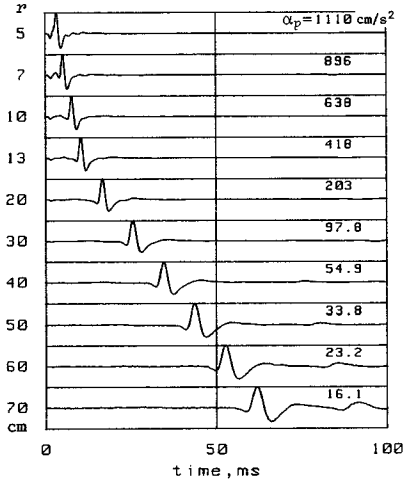


Fig. 13 Propagation of wave radiated from embedded foundation ( $m=185$  g, E-type).

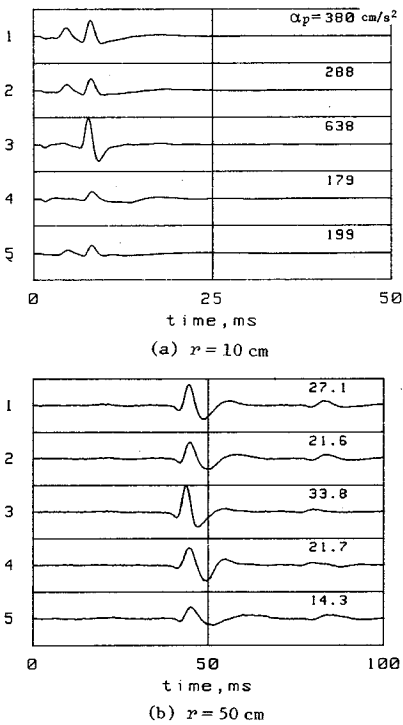


Fig. 14 Radiated waves from various foundations. 1 :  $m=110$  g, A-type, 2 : 185 g, A, 3 : 185 g, E, 4 : 185 g, F, 5 : 330 g, A.

示している。

Fig. 13 は E 型基礎から放射される波動の測定結果を示す。 Fig. 10 と比較すると、いくつかの相違点が認められる。すなわち、A 型基礎の場合に比較して、(1) 第 1 動は認められるものの顕著ではない、(2) 波動の衝撃応答部 (第 2 動) のピーク値は大きく、基礎近くの領域で大略 2 倍であり、かつ、山は鋭くなっている、(3) 第 2 動のピークの到達時間が若干早くなっている、(4) 減衰振動部の収束が早い、などである。(1) については、第 1 動の放射源が基礎底面にあり、基礎近くの領域では半無限体モデル表面に現われにくくなっているため、と考えられる。(4) については、埋設により剛性および減衰が大きくなっていることに対応した現象である。(2)、(3) については次項において、他の基礎の場合も含めて検討する。

c) 基礎質量、設置形態の放射波動への影響

Fig. 14 は、種々の基礎から放射される波動の  $r=10$  cm および 50 cm における測定結果を示す。A 型基礎の場合、質量を大きくすることにより波動振幅が顕著に小さくなり、また減衰振動部の周期が長くなっている。すなわち波形、振幅ともに基礎の衝撃振動応答に対応している様子がわかる。E 型基礎の場合、前項で述べたとおりである。F 型の場合、基礎は A 型とほぼ同じ応答を示すにもかかわらず、図 (a) でみると A 型、E 型の 1/3~2/3 程度の振幅であり、図 (b) で比較してみると、F 型の方が A 型に比較し減衰振動部の振幅が大きく、

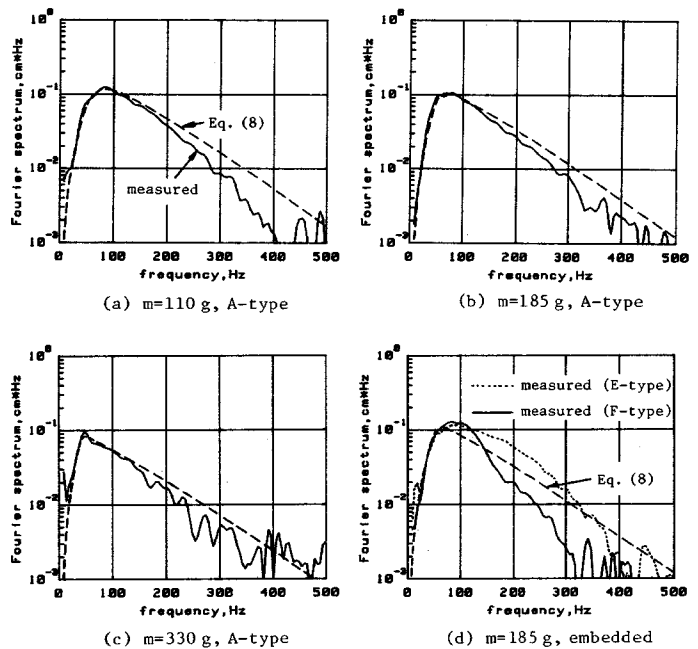


Fig. 15 Spectra of the waves shown in Fig. 14 (b).

周期が短くなる、などの顕著な違いが現われている。次に、これら波動を周波数領域で調べてみよう。

Fig. 15 は、Fig. 14 (b) に示す波動のうち、反射波を除去した部分のスペクトルである。A 型基礎の場合、高周波域を除いて計算値は実測値とよく一致している。なお、これらスペクトルのピークを与える周波数は、基礎の共振周波数とは必ずしも一致していない。E 型基礎のスペクトルは、同一質量の A 型基礎のそれと同程度か上回っており、したがって E 型基礎から放射される波動エネルギーは A 型基礎のそれより大きいことがわかる。F 型基礎の場合、低周波数域で E 型基礎を若干上回り、逆に高周波数域で顕著に小さくなる。次に、 $m = 185 \text{ g}$  の A、E および F 型基礎から放射される波動がもついくつかの特徴について考察する。

半無限弾性体内をステップ荷重で加振した場合の表面の波動変位を理論解析した Pekeris ら<sup>19)</sup>の結果をみると、観察される波動は表面加振の場合に比較し、高周波成分のとれた波形となっている。F 型基礎に対するスペクトル中で高周波成分が顕著に小さくなっているのは、この現象と対応している。E 型基礎の場合には、底面のほか、側面も波動の放射源となる。E 型基礎の場合、波動エネルギーが同一質量の A 型基礎のそれより大きくなったが、これは基礎の衝撃応答部はその設置形態にあまり影響されないにもかかわらず、波動の放射面積が大きくなっているため、と考えられる。なお、E 型基礎に対して前項で述べた、衝撃応答部第 2 動の到達が A 型基礎の場合より早くなるのは、波動の主たる放射源がより観測点に近い側にあると考えられる。すなわち、基礎側面からの放射波が波動の衝撃応答部の波形形成に大きく寄与していると考えられ、これにより衝撃応答部（第 2 動）の幅が狭くかつ振幅が大きくなり、結果として波動が高周波成分を多く含むことになる、といえよう。

#### d) 波動の振動レベルによる評価

これまでは、波動の物理的性質を調べてきた。本項では、これら波動が、公害振動の評価量である振動レベルとどのように対応するか調べてみる。

Fig. 16 は A 型 ( $m = 185 \text{ g}$ ) 基礎から放射された、 $r = 50 \text{ cm}$  における波動と、それに対する振動レベルの応答を示す。振動レベルは衝撃応答部の到達により大きく上昇し、その後の自由減衰振動の第 1 波で数 dB 上昇する。それ以後はほぼ横這いの状態が続いた後、ゆっくり下降する。この傾向は基礎の種類や測定位置によっても変わらない。すなわち、振動レベルは波動の衝撃応答部と、減衰振動部の最初の谷の組合せで決まる。

次に、基礎質量  $m$  と振動レベルの関係を Fig. 17 に示す。ただし、図では  $m$ 、 $r$  を Table 1 (c) に示す相似比に対応する量で示してある。F 型基礎の測定値は E

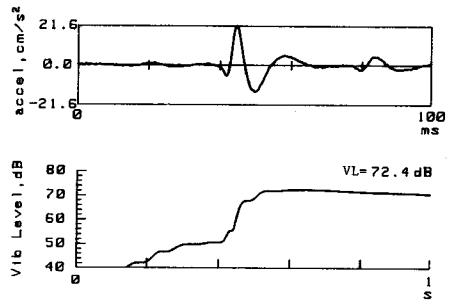


Fig. 16 Example of response of Vibration Level.

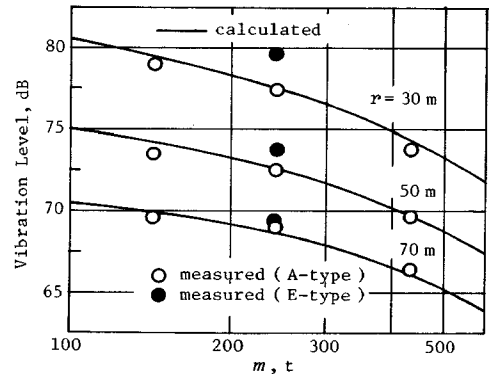


Fig. 17 Vibration Level vs. mass of foundation.

型のそれとほぼ重なっている。A 型基礎の場合、近似解析による計算値と測定値はよく一致している。また、基礎質量  $m$  を大きくすれば振動レベルが減少する傾向を明瞭に認められる。しかし、その効果は質量を 3 倍にすることにより、4~6 dB 程度であり、振動源から遠くなるに従ってその振動抑制効果は小さくなる。埋設基礎の場合、A 型基礎と比較して  $\alpha_p$ 、 $v_0$  は若干小さくなったが、振動レベルは逆に増加している。すなわち、基礎の動的応答量を小さくすることが、必ずしも放射される振動を抑制することにならないことがわかる。

## 5. まとめ

振動公害の発生源として問題視されている、鍛造機械のようなパルス状の衝撃力を発生する機械を想定し、媒質のポアソン比が 0.5 の均質、一様な半無限体モデルを用い、基礎および地盤の衝撃振動応答を、主として実験により検討した。あわせて近似解析法を示し、実験結果と随時比較した。得られた結果を要約すると以下のようになる。

(1) 衝撃力作用中の基礎の加速度応答量に影響する重要な因子はその質量であり、基礎の設置形態や地盤剛性の影響は少ない。ただし、ポアソン比が 0.5 の媒質では、地盤の付加質量により、見掛け上の基礎質量が大き



くなり、それに対応して応答量が小さくなる。

(2) 基礎から放射される波動は遠方の領域においてレイリー波として観察され、基礎の衝撃応答部と自由減衰振動部に明確に対応する波形を示す。波動の振動レベルは衝撃応答部の到達により大きく上昇し、減衰振動部の最初の谷によりさらに数 dB 上昇する形態をとる。

(3) 基礎近くの領域においては、横波の約 2 倍の速度をもち、かつ、距離に対する減衰の大きい波動が認められ、表面設置形基礎の場合これが顕著に認められた。この波動は、基礎形状に関係なくあたかも基礎中心の放射源から無指向性で放射されるような特徴をもつ。

(4) 正方形基礎から放射される波動の第 2 動とそれに続く部分の主たる放射源は、その 4 端であると考えられ、これらからの波動の重ね合わせにより、基礎近くの領域で強い指向性が現われる。しかし、遠方の領域において観察されるレイリー波は無指向性に近く、同一質量の円形基礎からの波動振幅とほぼ一致する。

(5) 表面設置形基礎の場合、その質量を増すことにより波動振幅を抑制することが可能である。しかし、その効果は質量を 3 倍にすることにより、振動レベルに換算して 4~6 dB 程度であり、基礎から遠くなるに従って質量による振動抑制効果は小さくなる。

(6) 側面拘束された埋設基礎の場合、基礎の応答量は表面設置形に比較し若干小さくなるが、放射される波動エネルギーは逆に大きくなった。これは、基礎の衝撃応答部は設置形態には余り影響されないにもかかわらず、波動の放射面が広がっているためと考えられる。

(7) 側面自由の埋設基礎の場合、基礎近くの領域においては、波動振幅は同一質量の表面設置型および側面拘束型基礎の場合に比較して、1/3~2/3 程度に小さくなる。しかし遠い領域においては、逆に波動の振幅は表面設置型基礎と比較し若干大きく、またそのスペクトルは高周波成分が小さくかつ低周波成分が大きい。

(8) 基礎底面下の複素剛性の実験式を用いた基礎の応答解析結果は測定結果とよく一致し、Veletsos らの近似解を用いても実用上十分な一致が得られた。また表面設置型基礎については、レイリー波の近似定常解を用い、基礎から遠い領域における波動を十分再現できることがわかった。

### 付録 A 振動レベルの算出

振動レベルの算出では、Table 1 (c) に示す相似比の仮定のもとで、同 (b) に示す実規模の地盤を想定した。離散的時系列データから、JIS に規定される振動レベルを得るためには、デジタルフィルターによる方法が最適であろう。北村<sup>20)</sup>はすでにこの方法による演算法を示している。ここでは、北村の方法を参考にした、振動レ

ベル算出のためのデジタルフィルターの設計の概要、振動感覚補正回路の周波数レスポンスおよび JIS に規定する動特性試験に対応する結果を簡単に述べる。

デジタルフィルターは、振動感覚補正回路、低域および高域遮断フィルター、積分回路などをアナログフィルターで近似的に実現したうえで、これにインパルス不変変換法<sup>21)</sup>を適用して巡回型フィルターとして構成した。入力サンプリング周期は 2.5 ms とした。指示部は時定数 0.6 秒の一次系とみなした。Fig. A-1 は振動感覚補正回路の周波数レスポンス (JIS 規格) およびデジタルフィルターのレスポンス (低域および高域遮断フィルターを含む) を示す。JIS 規格が満足されている。なお、JIS では指示計器の動特性を 31.5 Hz、継続時間 1 秒の正弦波入力に対する最大指示が、その周波数で振幅が等しい定常入力による指示に対し、 $-1.0 \pm 0.5$  dB と規定している。同入力でデジタルフィルターの応答をみたところ最大指示値は  $-0.9$  dB であり、規格を満足している。

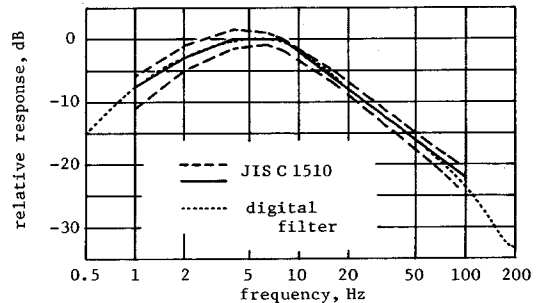


Fig. A-1 Frequency response of Vibration Level Meter (JIS C 1510) and the digital filter.

### 付録 B 振動源近くの速度変動

Fig. A-2 中の実線は、ポアソン比が 0.5 の半無限弾性体表面を垂直方向に定常加振した場合に放射される定常振動の垂直成分の伝搬速度の理論値<sup>18)</sup>である。図中の○印は半無限体モデルを用いた、点加振に近い状態での測定値である。測定値はモデル表面を直径 10 mm の棒で垂直方向に定常加振し、モデル表面上に配置した 2 つの PU 間の位相差から得た。加振周波数は 80 Hz~160 Hz、位相測定はデジタル型周波数特性解析器を用い、反射波の影響の少ない振動源近くの領域で測定を行った。

測定値は、理論値と概略合っており、振動源近傍で大きな速度変動のあることが確認された。図中の△、×印はおのおの、120 Hz、160 Hz における、半径 3 cm の基礎からの波動の速度の測定値である。加振面が広がり、かつ、周波数が高くなることにより、速度の変動傾向が

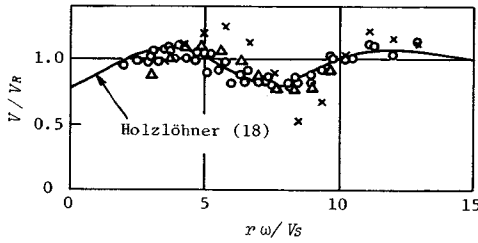


Fig. A-2 Velocity of elastic wave in near field.

より一層大きくなっている。

#### 参考文献

- 1) 渡辺清治：機械基礎の振動騒音対策，基礎工，Vol. 3, No. 10, pp. 35~45, 1975.
- 2) Richart, H., Wood, R. D. and Hall, J. R. : Vibrations of soils and foundations, Prentice-Hall Inc., 1970.
- 3) 二井義則：垂直方向に振動している円形剛板より放射される定常振動，音響学会誌，Vol. 39, pp. 675~682, 1983.
- 4) 二井義則：垂直方向に振動している矩形剛板より放射される定常振動，音響学会誌，Vol. 40, pp. 28~35, 1984.
- 5) 二井義則：水平，回転方向に振動している基礎より放射される定常振動，音響学会誌，Vol. 42, pp. 452~460, 1986.
- 6) Barkan, D. D. : Dynamics of bases and foundations, McGraw-Hill Book Co, 1962.
- 7) 沢潟作雄：機械基礎の設計と据付，丸善，1968.
- 8) 山原 浩：環境保全のための防振設計，彰国社，1974.
- 9) Novak, M. : Foundations for shock-producing machines, Can. Geotech. J., Vol. 20, pp. 141~158, 1983.
- 10) 通産省立地公害局：振動防止技術指導書（鍛工品製造業部門），（財）鍛造技術研究所，1978.
- 11) 塩田正純・高津 熟：工場機械から発生する公害振動，騒音制御，Vol. 4, pp. 35~38, 1980.
- 12) 高津 熟：工場機械から発生する公害振動，騒音制御，Vol. 6, No. 3, pp. 32~36, 1982.
- 13) Nii, Y. : Experimental Half Space Dynamic Stiffness, J. Geotech. Eng., ASCE (投稿中).
- 14) Veletsos, A. S. and Verbic, B. : Basic response functions for elastic foundations, J. Eng. Mech. Div., ASCE, Vol. 100, No. EM 2, pp. 189~201, 1974.
- 15) Luco, J. E. and Westmann, R. A. : Dynamic response of circular footings, J. Eng. Mech. Div., ASCE, Vol. 97, No. EM 5, pp. 1381~1395, 1971.
- 16) 沢潟作雄：打撃鍛造における衝撃応力について，機械学会誌，Vol. 61, No. 471, pp. 384~391, 1958.
- 17) Elorduy, J., Nieto, J. A. and Szekely, E. M. : Dynamic response of bases of arbitrary shape subjected to periodic vertical loading, Proc. Inter. Symp. on Wave Propag. Dyn. Properties Earth Materials, Albuquerque, pp. 105~121, 1967.
- 18) Holzlöhner, U. : Vibrations of the elastic half-space due to vertical surface loads, Earthq. Eng. and Structural Dynamics, Vol. 8, pp. 405~414, 1980.
- 19) Pekeris, C. L. and Lifson, H. : Motion of the surface of a uniform elastic half-space produced by a buried pulse, J. Acous. Soc. Amer., Vol. 29, pp. 1233~1238, 1957.
- 20) 北村泰寿：発破振動における振動速度と振動レベルの対応について，土木学会論文報告集，No. 362/I-4, pp. 481~484, 1985.
- 21) 加川幸雄：アナログ/デジタルフィルタ，科学技術出版，1981.

(1986. 6. 3・受付)