

# 粒体層の振動沈下に関する一実験とその考察

(鉛直, 水平振動の比較)

最上 幸夫\*・阪本 紀博\*・藤原 東雄\*\*

## An Experimental Study and Its Consideration on the Depressions of Granular Layers under Vibrating Load

—Comparison with Vertical and Horizontal Vibrations—

Sachio MOGAMI, Michihiro SAKAMOTO and Haruo FUJIWARA

### Abstract

We have been making a study of vibrating depressions of granular layers (sand and gravel) under vibrating loads. In this paper we measured permanent surface depressions and internal accelerations when the vertical or horizontal vibrations acted on the granular layers, and studied the comparison with both vibrations on the basis of some theoretical conceptions. We obtained several conclusions as follows :

- (1) In both vibrations conditions of vibrating depressions were almost similar, and in the first term of vibration both compressive and flowing depressions were recognized, after the time passing compressive depressions were completed and only flowing depressions were reserved.
- (2) Compared with both vibrations, depressions by the horizontal were more remarkable in low frequency (800~1300 rpm) and on the other hand depressions by the vertical were more remarkable in high frequency (1800~2300 rpm).
- (3) The tendency above described is clearly recognized by comparing characteristic constants A, B and  $\tan\alpha$  on the vibrating depressions we proposed here.

### 1. 緒 言

一般にすべての構造物の基礎は地盤に接しており、したがって構造物の安定いかんはある程度地盤の力学的性質に左右されることはいうまでもない。構造物基礎に接する地盤としては多くの場合、碎石、栗石などの層が界面付近に挿入され、それ以下が自然地盤ということになるが、自然地盤が軟弱な場合はくい基礎や場合によっては、砂地盤に置き換えたりすることが行なわれる。したがってこのような碎石層や砂層からなる地盤の力学的性状を究明することは、きわめて重要な課題といわねばならないが、その静力学的性質についてはかなりの程度まで究明されているといえるが、その動力学的性質についてはまだ多くの未解決な問題が残されており、今後の研究に待つべきことが多いものと考えられる。著者らは従来から碎石、砂などからなる、いわゆる粒体層の動力学的性状について実験的

研究を行なってきたが、とくに動的荷重に基づく粒体層の永久沈下（以下振動沈下という）に着目し、その諸特性について種々検討を進めてきたのである。本文においては、粒体層が鉛直方向ならびに水平方向の振動力を受けた場合の表面振動沈下および粒体層内の1点における振動加速度を測定し、実験的ならびに若干の理論的考察を行なったので、以下これについて報告する。

### 2. 実験の概要

粒体層が振動をうけた場合の振動沈下状態を鉛直、水平振動のそれぞれの場合についてしらべ、それらの特性を明らかにする目的で、つぎのような要領によつて室内実験を行なった。まず内容積 $60 \times 110 \times 50\text{cm}$ のコンクリートわくを造り、これに碎石、砂などの層厚割合を種々に変えて、層厚10cmごとに重量1kgのハンマーで均等に突き固めて粒体層を作成した。

\* 土木工学教室

\*\* 松江工業高等専門学校土木科

碎石は最大粒径25mm以下のものを混入したもの、砂は北九州市海浜で採取されたもので、これらの代表的な粒径加積曲線を Fig. 1 に示す。なお主として実験の対象とした碎石および砂の層厚 50cm に対する層厚割合は Table 1 のとおりである。粒体層として

めた。この測定加速度は後述の解析法の妥当性を検証するためのものである。

### 3. 実験結果とその考察

#### 3.1 実験結果

得られた実験結果の一例を示すと、Fig. 2～Fig. 5 のとおりである。

そこでこのような振動沈下を生ずる基礎の振動に対する安定性を評価するための特性値を求める方法については、すでに提案したとおりであるが<sup>1)</sup>、この方法を適用するためには、振動によつて基礎へ伝えられる振動伝達力を求める必要が

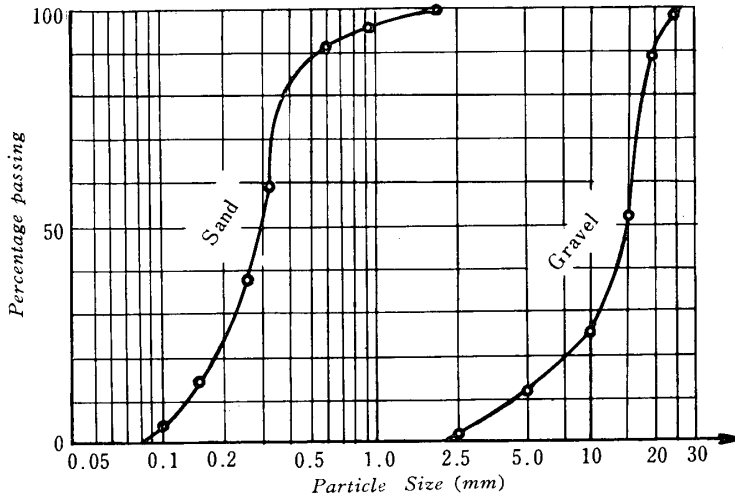


Fig. 1 Particle size accumulation curves of sand and gravel

Table 1 Proportions of gravel and Sand layers

Gravel layers	50cm	40cm	25cm	0cm
Sand layers	0cm	10cm	25cm	50cm

は、碎石、砂いづれも自然乾燥状態の場合および水で十分飽和された場合(長時間降雨の続いた場合を仮定)について実験を行ない、両層の混入した場合は常に碎石層を上部に敷いた。このようにして作成した粒体層上に、モーターをフレキシブルシャフトで接続した偏心マスつきの対向回転型起振機(底面積 20×22cm, 鉛直振動の場合は自重 42kg, 水平振動の場合は自重 32kg)を載荷し、振動数の範囲は 750~2400rpm であるが、本実験では主として 800, 1300, 1800, 2300 rpm の 4 つの場合について実験した。起振機の振動の作用時間は、実験に要する時間の都合上、各振動数の場合とも 40 分間とし、振動をかけ始めてから最初は 10 秒ごと、1 分間経過後は 5 分間までは 1 分ごと、それ以後は 5 分間ごとに起振機にとりつけたダイヤルゲージによつて粒体層表面の振動沈下量を読みとつた。また一方粒体層内の振動状態を検討するため、起振機重心軸上、層表面より深さ 15cm の個所に BA 型小型加速度計(測定範囲 2G, 新興通信製)を埋め込み、これをリード線によつて動ひずみ測定器に接続増幅してペン書きオシログラフ紙上に振動加速度を記録せし

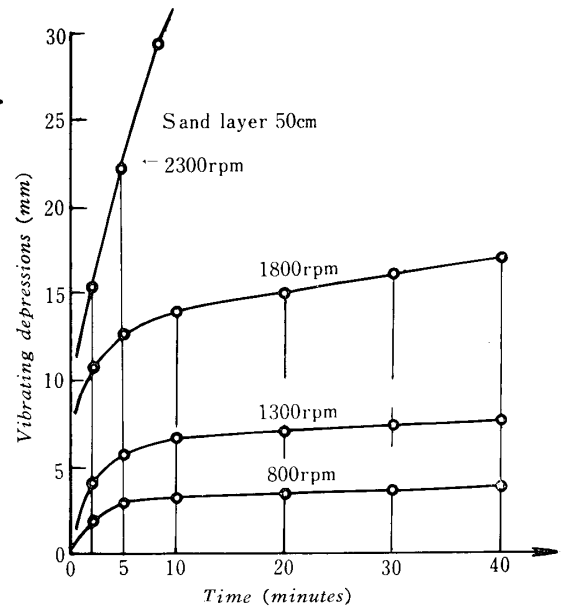


Fig. 2 The case of vertical vibration

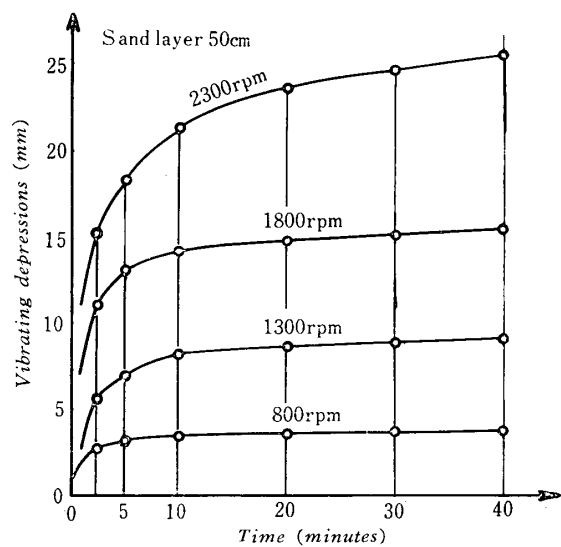


Fig. 3 The case of horizontal vibration

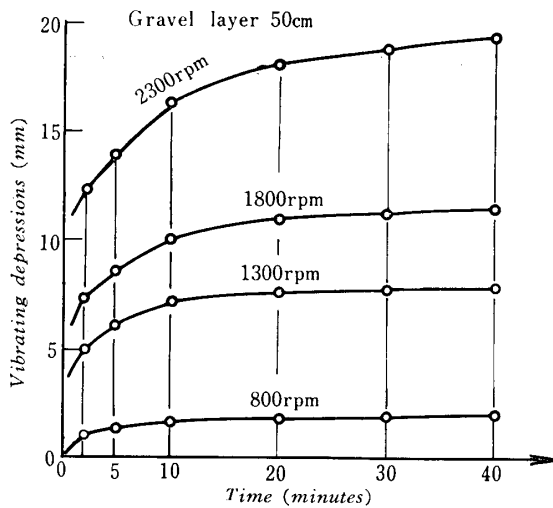


Fig. 4 The case of vertical vibration

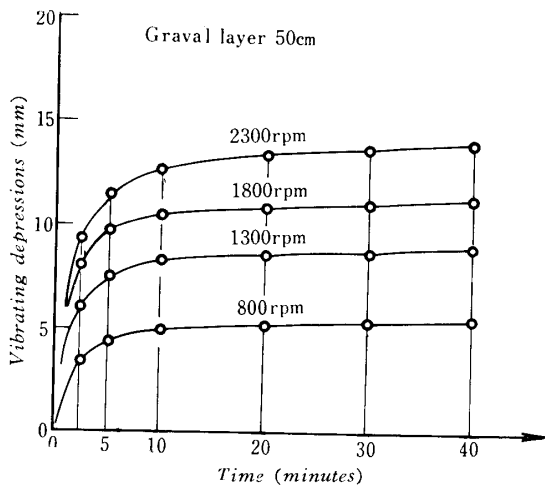


Fig. 5 The case of horizontal vibration

ある。以下この求め方について述べる。

3.2 振動伝達力の算定

3.2.1 鉛直振動 (単層の場合)

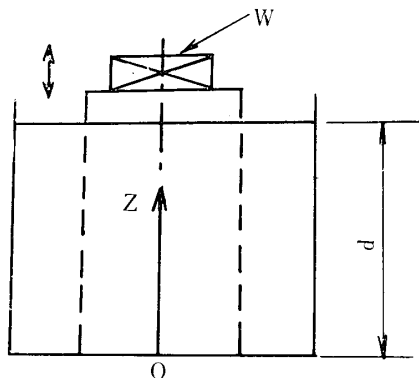


Fig. 6 Vertical vibration (simple layer)

Fig. 6 のごとく、自重  $W$ 、底面積  $A=b \times c$  の起

振機が鉛直振動を行なっている場合を考えると、コンクリート容器底部は固定端とみなしうるから、ここを座標原点  $O$  にとり、鉛直上方に  $Z$  軸を採り、簡単に点線で示した仮想プリズム部分の土の振動について考える。この点線で示した境界線に沿うては界面摩擦抵抗力が働き、これは近似的にこの境界線に作用する静土圧に比例するものと仮定すれば、仮想プリズムの上下振動に対する運動方程式はつぎのごとく表わされる。

$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{Aw}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - r(d-z) = 0 \quad (1)$$

ここに、 $E$ : 仮想プリズムの弾性係数、 $A$ : 起振機底面積 (プリズム断面積)、 $u$ : プリズムの上下動変位、 $w$ : プリズムの単位体積の重量、 $g$ : 重力の加速度、 $r$ : 振動時における境界線単位厚さ当たりの摩擦抵抗力、 $d$ : 粒体層の深さ、 $t$ : 時間。

式(1)の解は  $\omega$  なる定常振動状態に対しては、つぎのようになる。

$$u = (C \cos \alpha z + D \sin \alpha z) \cos \omega t + \frac{r}{6EA} (d-z)^3 \quad (2)$$

ここに、

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{w}{Eg}} \quad (3)$$

一方、起振機自体の強制力による定常振動の状態について考えると、このときの鉛直動的相当バネ常数を  $K_v$  とすれば、減衰項を無視して近似的に次式で表わされる。

$$\frac{W}{g} \ddot{y} + AK_v y = P \cos \omega t \quad (4)$$

ここに、 $W$ : 起振機自重、 $y$ : 起振機の上下動変位、 $A$ : 起振機底面積、 $K_v$ : 鉛直方向の動的相当バネ常数、

$P$ : 強制力、 $\omega$ : 強制円振動数。

式(4)の定常解は周知のごとく、つぎのようになる。

$$y = \frac{Pg}{W} \frac{1}{n^2 - \omega^2} \cos \omega t \quad (5)$$

ここに、

$$n^2 = AgK_v / W \quad (6)$$

そこで式(2)と式(5)の解の連続性より、積分定数  $C$ 、 $D$  を決める境界条件はつぎのようになる。

$$\left. \begin{aligned} z=0 : & u=0 \\ z=d : & |u_{max}| = |y_{max}| \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(7)の境界条件を用いて、 $C$ 、 $D$  を決めると、土柱プリズムの上下動変位  $u$  はつぎのごとくなる。

$$u = \left\{ -\frac{rd^3}{6EA} \cos \alpha z + \left( \frac{Pg/W}{n^2 - \omega^2} + \frac{rd^3}{6EA} \cos \alpha d \right) \frac{\sin \alpha z}{\sin \alpha d} \right\} \times \cos \omega t + \frac{r}{6EA} (d-z)^3 \quad (8)$$

したがって土柱プリズムの絶対最大加速度は次式で求

められる。

$$\left| \ddot{u}_{max} \right| = \left\{ -\frac{r\omega^2 d^3}{6EA} \cos \alpha z + \left( \left| \frac{Pg/W}{(n/\omega)^2 - 1} \right| + \frac{r\omega^2 d^3}{6EA} \cos \alpha d \right) \frac{\sin \alpha z}{\sin \alpha d} \right\} \quad (9)$$

なお摩擦抵抗力  $r$  については近似的に次式によつて求めることとした。すなわち、

$$r = \mu w l E_h \quad (10)$$

ここに、 $\mu$ ：振動時の境界線に沿う動摩擦係数（この正確な値については今後の研究に待たねばならないが、本文ではとりあえず佐藤博士の Grind Stone 実験結果<sup>2)</sup>から概略値を推定した）、 $w$ ：土柱プリズム単位体積重量、 $l$ ：起振機底面の周辺長、 $E_h$ ：水平静土圧係数（土の内部摩擦角から決まる）。

### 3.2.2 鉛直振動（2層の場合）

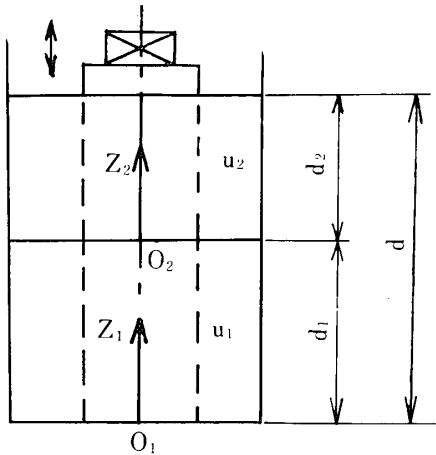


Fig. 7 Vertical vibration (two layers)

2層の場合も単層の場合と同様に取り扱うことができる。Fig. 7に示す座標系について、各層の土柱プリズムの上下振動に対する運動方程式はそれぞれつぎのように表わされる。

$$E_1 A \frac{\partial^2 u_1}{\partial z_1^2} - \frac{A w_1}{g} \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} - r_1 (d - z_1) = 0 \quad (11)$$

$$E_2 A \frac{\partial^2 u_2}{\partial z_2^2} - \frac{A w_2}{g} \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} - r_2 (d_2 - z_2) = 0 \quad (12)$$

ただし、添字は各層を表わし、その他の記号は式(1)に同じである。ある円振動数  $\omega$  の定常振動状態に対する式(11)、(12)の解はそれぞれつぎのごとくなる。

$$u_1 = (C_1 \cos \alpha_1 z_1 + D_1 \sin \alpha_1 z_1) \cos \omega t + \frac{r_1}{6 E_1 A} (d - z_1)^3 \quad (13)$$

$$u_2 = (C_2 \cos \alpha_2 z_2 + D_2 \sin \alpha_2 z_2) \cos \omega t + \frac{r_2}{6 E_2 A} (d_2 - z_2)^3 \quad (14)$$

ここに、

$$\alpha_1 = \omega \sqrt{w_1 / (E_1 g)}, \quad \alpha_2 = \omega \sqrt{w_2 / (E_2 g)} \quad (15)$$

積分定数を決める境界条件として次式を用いる。

$$\left. \begin{aligned} z_1 = 0 : \quad u_1 &= 0 \\ z_1 = d_1, \quad z_2 = 0 : \quad |u_{1max}| &= |u_{2max}|, \\ & \left| E_1 \left( \frac{\partial u_1}{\partial z_1} \right)_{max} \right| = \left| E_2 \left( \frac{\partial u_2}{\partial z_2} \right)_{max} \right| \\ z_2 = d_2 : \quad |u_{2max}| &= \left| \frac{Pg}{W} \cdot \frac{1}{n^2 - \omega^2} \right| \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式(16)の境界条件を用いて各積分定数を決めると、つぎのようになる。

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= -\frac{r_1 d^3}{6 E_1 A}, \\ D_1 &= \left\{ \frac{Pg}{w} \frac{1}{n^2 - \omega^2} + \frac{\cos \alpha_2 d_2}{6 A} \left\{ \frac{r_1 d^3 \cos \alpha_1 d_1}{E_1} - d_2^3 \left( \frac{r_1}{E_1} - \frac{r_2}{E_2} \right) \right\} - \frac{\sin \alpha_2 d_2}{6 E_2 \alpha_2^2 A} \left\{ r_1 \alpha_1 d^3 \sin \alpha_1 d_1 + 3 d_2^2 (r_1 - r_2) \right\} \right\} / (\sin \alpha_1 d_1 \cdot \cos \alpha_2 d_2 + E_1 \alpha_1 / E_2 \alpha_2 \cdot \cos \alpha_1 d_1 \cdot \sin \alpha_2 d_2) \\ C_2 &= D_1 \sin \alpha_1 d_1 - \frac{r_1 d^3}{6 E_1 A} \cos \alpha_1 d_1 + \frac{d_2^3}{6 A} \left( \frac{r_1}{E_1} - \frac{r_2}{E_2} \right) \\ D_2 &= \frac{E_1 \alpha_1}{E_2 \alpha_2} \left( \frac{r_1 d^3}{6 E_1 A} \sin \alpha_1 d_1 + D_1 \cos \alpha_1 d_1 \right) + \frac{d_2^2}{2 E_2 \alpha_2 A} (r_1 - r_2) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式(17)によつて各積分定数が決まるから、各層中の絶体最大加速度値は、それぞれ次式から求められる。

$$\left. \begin{aligned} | \ddot{u}_{1max} | &= \omega^2 (C_1 \cos \alpha_1 z_1 + D_1 \sin \alpha_1 z_1) \\ | \ddot{u}_{2max} | &= \omega^2 (C_2 \cos \alpha_2 z_2 + D_2 \sin \alpha_2 z_2) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

ただし、式(16)における  $n^2$  の値は次式から求められる。

$$n^2 = AK_{v2}g/W \quad (19)$$

$$K_{v0} = \frac{2 K_{v1} \cdot K_{v2}}{K_{v1} + K_{v2}} \quad (20)$$

ここに、 $K_{v1}$ 、 $K_{v2}$ ：それぞれ下層および上層の鉛直動的相当バネ常数を表わす。

また、

$$r_1 = \mu_1 w_1 l E_{h1}, \quad r_2 = \mu_2 w_2 l E_{h2} \quad (21)$$

ここに、記号1、2はそれぞれ下層および上層のものを表わし、その他の記号は式(10)と同様である。

### 3.2.3 水平振動（単層の場合）

Fig. 8に示す点線で囲まれた土柱プリズムの水平振動に対する運動方程式は前同様に水平方向の摩擦抵抗力を考慮すると、つぎのごとくなる。

$$k' AG \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - b K_h u - \frac{Aw}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + r(d - z) = 0 \quad (22)$$

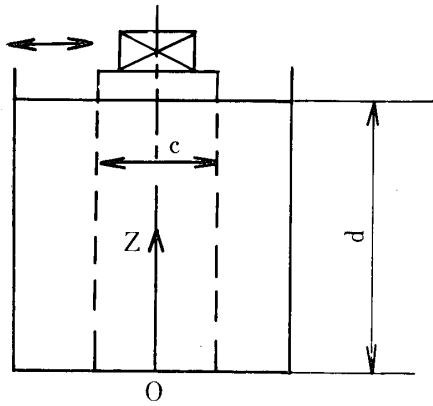


Fig. 8 Horizontal vibration (simple layer)

ここに、

$k'$ : 断面によつてきまる定数で矩形断面では $\frac{2}{3}$ ,  
 $A$ : 起振機底面 (または土柱プリズム) の断面積,  
 $G$ : 土柱プリズムのせん断弾性係数 ( $G = E/2(1+\nu)$ )  
 $u$ : 土柱プリズムの水平振動変位,  $b$ : 起振機底面奥行幅,  $K_h$ : プリズム水平方向地盤係数,  $w$ : プリズムの単位体積重量,  $g$ : 重力の加速度,  $r$ : 土柱単位面積当たりの動摩擦抵抗力,  $d$ : 土柱の全深さ.

式(22)のある振動数  $\omega$  における定常解は次式のように表わされる.

$$u = (C \cosh \beta z + D \sinh \beta z) \cos \omega t + \frac{r(d-z)}{bK_h} \quad (23)$$

ここに、

$$\beta^2 = \frac{1}{k'AG} \left( bK_h - \frac{Aw}{g} \omega^2 \right) \quad (24)$$

一方起振機が水平強制力  $P \cos \omega t$  をうけた場合の振動方程式は、

$$\frac{W}{g} \ddot{y} + AK_h y = P \cos \omega t \quad (25)$$

ただし  $W$ : 起振機自重,  $A$ : 起振機底面積,  $K_h$ : 水平方向動的相当バネ常数,  $y$ : 起振機の水平変位,  $P$ : 水平強制力,  $\omega$ : 強制円振動数.

式(25)の解は周知のごとく、次式で与えられる.

$$y = \frac{Pg}{W} \frac{1}{n^2 - \omega^2} \cos \omega t \quad (26)$$

$$\text{ここに、} \quad n^2 = \frac{AK_h g}{W} \quad (27)$$

そこで式(23)の積分定数を決める境界条件として、

$$\left. \begin{aligned} z=0: & \quad u=0 \\ z=d: & \quad |u_{max}| = |y_{max}| \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

を採用し、積分定数を決定すれば、式(23)はつぎのようになる.

$$u = \left\{ -\frac{rd}{bK_h} \cosh \beta z + \left( \frac{Pg}{W} \frac{1}{n^2 - \omega^2} + \frac{rd}{bK_h} \cosh \beta d \right) \frac{\sinh \beta z}{\sinh \beta d} \right\} \cos \omega t + \frac{r(d-z)}{bK_h} \quad (29)$$

なお水平方向の動的摩擦抵抗力  $r$  は近似的に次式から求められる.

$$r = 2 \mu c w E_h \quad (30)$$

ここに、 $\mu$ : 境界線に沿う水平方向動摩擦係数,  $c$ : 起振機の正面幅,  $w$ : 土柱単位体積重量,  $E_h$ : 水平静土圧係数.

また加速度の絶対最大値は式(29)より、

$$\left| \ddot{u}_{max} \right| = -\frac{rd\omega^2}{bK_h} \cosh \beta z + \left( \frac{Pg}{W} \frac{1}{\left( \frac{n}{\omega} \right)^2 - 1} + \frac{rd\omega^2}{bK_h} \cosh \beta d \right) \frac{\sinh \beta z}{\sinh \beta d} \quad (31)$$

で与えられる.

### 3.2.4 水平振動 (2層の場合)

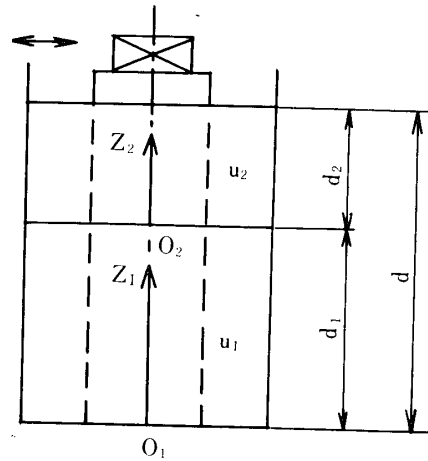


Fig. 9 Horizontal vibration (two layers)

2層の場合も単層の場合と同様の式が成立する.

Fig. 9を参照して、各層に対してはそれぞれ次式が成立する.

$$k'AG_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial z_1^2} - bK_{h1} u_1 - \frac{Aw_1}{g} \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} + r_1(d-z_1) = 0 \quad (32)$$

$$k'AG_2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial z_2^2} - bK_{h2} u_2 - \frac{Aw_2}{g} \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} + r_2(d_2-z_2) = 0 \quad (33)$$

ここに、記号1, 2はそれぞれ下層および上層を表わし、その他の記号は式(22)に準ずる.

ある円振動数  $\omega$  の定常振動状態における式(32), (33)の定常解はそれぞれ次式与えられる.

$$u_1 = (C_1 \cosh \beta_1 z_1 + D_1 \sinh \beta_1 z_1) \cos \omega t + \frac{r_1(d-z_1)}{bK_{h1}} \quad (34)$$

$$u_2 = (C_2 \cosh \beta_2 z_2 + D_2 \sinh \beta_2 z_2) \cos \omega t + \frac{r_2(d_2-z_2)}{bK_{h2}} \quad (35)$$

ここに、

$$\beta_1^2 = \frac{1}{k'AG_1} \left( bK_{h1} - \frac{Aw_1}{g} \omega^2 \right), \quad \beta_2^2 = \frac{1}{k'AG_2} \times \left( bK_{h2} - \frac{Aw_2}{g} \omega^2 \right) \quad (36)$$

式(34), (35)の積分常数を決める境界条件として、

$$\left. \begin{aligned} z_1 = 0 : \quad u_1 &= 0 \\ z_1 = d_1, z_2 = 0 : \quad |u_{1max}| &= |u_{2max}|, \\ &G_1 \frac{\partial u_1}{\partial z_1} = G_2 \frac{\partial u_2}{\partial z_2} \\ z_2 = d_2 : \quad |u_{2max}| &= Pg/W \cdot \frac{1}{n^2 - \omega^2} \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} n^2 &= AK_{h0}g/W \\ K_{h0} &= \frac{2K_{h1} \cdot K_{h2}}{K_{h1} + K_{h2}} \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

ここに、 $K_{h1}$ ,  $K_{h2}$  はそれぞれ下層および上層の水平動の相当バネ常数を表す。式(37)の境界条件を用いて積分常数を決めると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} G_1 &= -\frac{r_1 d}{bK_{h1}} \\ D_1 &= \left\{ \frac{Pg}{W} \frac{1}{n^2 - \omega^2} - C_1 \left( \cosh \beta_1 d_1 \cdot \cosh \beta_2 d_2 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{G_1 \beta_1}{G_2 \beta_2} \sinh \beta_1 d_1 \cdot \sinh \beta_2 d_2 \right) - \cosh \beta_2 d_2 \right. \\ &\quad \left. \left( \frac{r_1 d_1}{bK_{h1}} - \frac{r_2 d_2}{bK_{h2}} \right) + \frac{\sinh \beta_2 d_2}{G_2 \beta_2} \left( \frac{G_1 r_1}{bK_{h1}} - \frac{G_2 r_2}{bK_{h2}} \right) \right. \\ &\quad \left. \left( \sinh \beta_1 d_1 \cdot \cosh \beta_2 d_2 + \frac{G_1 \beta_1}{G_2 \beta_2} \cosh \beta_1 d_1 \cdot \sinh \beta_2 d_2 \right) \right\} \\ C_2 &= C_1 \cosh \beta_1 b_1 + D_1 \sinh \beta_1 d_1 \\ &\quad + \left( \frac{r_1 d_1}{bK_{h1}} - \frac{r_2 d_2}{bK_{h2}} \right) \\ D_2 &= \frac{G_1 \beta_1}{G_2 \beta_2} (C_1 \sinh \beta_1 d_1 + D_1 \cosh \beta_1 d_1) \end{aligned}$$

$$-\frac{1}{G_2 \beta_2} \left( \frac{G_1 r_1}{bK_{h1}} - \frac{G_2 r_2}{bK_{h2}} \right) \quad (39)$$

式(39)によつて各積分常数が決まるから、

各層中加速度の絶体最大値は次式から計算される。

$$\left. \begin{aligned} |u_{1max}| &= \omega^2 (C_1 \cosh \beta_1 z_1 + D_1 \sinh \beta_1 z_1) \\ |u_{2max}| &= \omega^2 (C_2 \cosh \beta_2 z_2 + D_2 \sinh \beta_2 z_2) \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

また各層の水平動摩擦抵抗力  $r_1$ ,  $r_2$  はそれぞれ次式から近似的に求められる。

$$r_1 = 2 \mu_1 c w_1 E_{h1}, \quad r_2 = 2 \mu_2 c w_2 E_{h2} \quad (41)$$

ただし、各記号は式(3)に準ずる。

### 3.3 振動沈下に関する考察

前節において述べた方法によつて鉛直、水平振動のそれぞれの場合に対する振動変位が求められるから、振動による地中への単位面積当たりの伝達力はそれぞれ次式によつて算定される。

$$\text{鉛直振動: } R_v = \frac{Pg}{W} \frac{K_v}{n^2 - \omega^2} \quad (42)$$

$$\text{水平振動: } R_h = \frac{Pg}{W} \frac{K_h}{n^2 - \omega^2} \quad (43)$$

ただし、式(42)と式(43)における  $n^2$  の値は異なり、単層の場合はそれぞれ式(6)および式(27)、2層の場合はそれぞれ式(19)および(38)から求められることに注意を要する。一方起振機重心軸上、基礎表面より深さ15cmの個所に埋め込んだ小型加速度計による絶体最大加速度の測定値を整理してみると、上述の振動理論によつてこれらの測定値をうまく説明できないことが判明した。すなわち、基礎の振動特性は単一なバネ系としては扱えず、バネ常数は非線型特性をもつものと仮定しなければならないことがわかつた。そこで近似的な取り扱い方としては、特定の強制力および振動数が作用した場合の定常振動に対しては線型振動を仮定し、測定した絶体最大加速度値から逆に、そのときの固有振動数およびバネ常数を求めてみた。2, 3の代表的な

Table 2 Values of  $K_v$ ,  $K_h$  and  $n$

Vibration K <sub>v</sub> , K <sub>h</sub> , n	Vertical vibration						Horizontal vibration					
	K <sub>v</sub>	n	K <sub>v</sub>	n	K <sub>v</sub>	n	K <sub>h</sub>	n	K <sub>h</sub>	n	K <sub>h</sub>	n
Frequency												
800 rpm	1.05	104	1.00	101	0.96	99	0.82	105	0.77	102	0.73	99
1300 "	3.23	182	3.16	180	3.03	178	2.97	200	2.74	192	2.54	185
1800 "	8.14	289	7.85	282	7.59	279	7.59	320	6.98	306	6.46	295
2300 "	18.43	435	16.58	411	14.74	389	15.17	452	13.24	422	11.76	398
Foundation	gravel 50cm		gravel 25cm		gravel 0cm		gravel 50cm		gravel 25cm		gravel 0cm	
	sand 0cm		sand 25cm		sand 50cm		sand 0cm		sand 25cm		sand 50cm	

Unit:  $K_v$ ,  $K_h$  (kg/cm<sup>3</sup>),  $n$  (circular frequency)

Table 3 Values of  $R_v$  and  $R_h$  ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

(a) Values of  $R_v$

Frequency Foundation		Frequency			
		800 rpm	1300 rpm	1800 rpm	2300 rpm
Gravel	50cm	0.0239	0.0504	0.0743	0.1001
Gravel	25cm	0.0265	0.0519	0.0763	0.1039
Sand	25cm				
Sand	50cm	0.0296	0.0532	0.0785	0.1125

(b) Values of  $R_h$

Frequency Foundation		Frequency			
		800 rpm	1300 rpm	1800 rpm	2300 rpm
Gravel	50cm	0.0233	0.0414	0.0653	0.0973
Gravel	25cm	0.0258	0.0446	0.0686	0.1033
Sand	25cm				
Sand	50cm	0.0297	0.0484	0.0722	0.1113

基礎について求めた例を Table 2 に示す。

さらに Table 2 の結果を用いて、式(42)、(43)より  $R_v$ 、 $R_h$  を算出した結果を Table 3 に示す。

したがって振動沈下に対する特性値は Table 3 の結果を用い、以下のようにして求めることができる。

実験による振動沈下曲線はかなり複雑であつて著者の一人が提案した理論式<sup>3)</sup>をそのまま適用することは必ずしも適当とはいえないようであるから、ここではつぎのような方法を採用して基礎の振動沈下に対する特性値を求めることとした。すなわち、振動初期の圧縮沈下と流動沈下が併存する沈下過程に対しては、

$$y_n = B \left[ 1 - \left( \frac{A}{A+R} \right)^n \right] \quad (44)$$

ここに、 $y_n$  : 振動が  $n$  回繰返された後に生じた振動沈下量、 $A$ 、 $B$  : この沈下過程における基礎の沈下特性値、 $R$  : 基礎単位面積当たりの振動伝達力を表わし、鉛直振動の場合は  $R_v$ 、水平振動の場合は  $R_h$  を用いる。

つぎにある程度時間が経過し、流動沈下のみが生ずる過程の特性値としては、その流動こう配の大小によって表わすのが最も簡明と思われるので、これを  $\tan \alpha$  で表わせば、

$$\tan \alpha = (y_n - y_m) / (n - m), \quad (n > m) \quad (45)$$

ここに、

$m$  : 流動沈下が始まる時の繰返し回数、 $n$  :  $m$  よりもかなり大きい任意の繰返し回数、 $y_m$ 、 $y_n$  はそれぞれ、 $m$ 、 $n$  回の繰返し回数のときの振動沈下量を表わす。

本実験の場合の整理に当つては一応振動繰返し回数の単位は 1 万回とした。その結果各実験曲線に式(44)および式(45)を適用し、振動沈下に対する基礎の特性値  $A$ 、 $B$  および  $\tan \alpha$  を求めた一例を Table 4 に示す。

Table 4 を参照すると、一般に  $A$ 、 $B$  および  $\tan \alpha$  の値が小さいほど、振動沈下に対して安定な基礎であるといえることができる。同一の基礎に対しては、振動数の低い範囲では、水平振動の方が鉛直振動よりも

Table 4 Values of  $A$ ,  $B$  and  $\tan \alpha$

(a) Vertical vibrations

Frequency Foundation		Frequency											
		800 rpm			1300 rpm			1800 rpm			2300 rpm		
		A	B	$\tan \alpha$	A	B	$\tan \alpha$	A	B	$\tan \alpha$	A	B	$\tan \alpha$
Gravel	50cm	0.0010	1.43	0.080	0.0051	5.12	0.132	0.0098	7.33	0.172	0.0233	11.55	0.396
Gravel	25cm	0.0013	2.41	0.083	0.0056	5.48	0.168	0.0121	7.96	0.261	0.0306	16.34	0.696
Sand	25cm												
Sand	50cm	0.0023	3.65	0.122	0.0062	6.35	0.205	0.0132	12.08	0.352	0.0378	27.25	1.452

(b) Horizontal vibrations

Frequency A, B, tan $\alpha$		800 rpm			1300 rpm			1800 rpm			2300 rpm		
		A	B	tan $\alpha$	A	B	tan $\alpha$	A	B	tan $\alpha$	A	B	tan $\alpha$
Foundation													
Gravel	50cm	0.0042	5.01	0.125	0.0074	7.22	0.212	0.0112	8.15	0.169	0.0182	10.65	0.261
Gravel Sand	25cm 25cm	0.0011	2.62	0.085	0.0079	8.11	0.254	0.0125	10.24	0.322	0.0235	13.68	0.454
Sand	50cm	0.0021	3.72	0.088	0.0093	8.32	0.287	0.0152	13.58	0.493	0.0283	18.97	0.781

Unit : A...kg/cm<sup>2</sup>, B...mm, tan  $\alpha$ ...mm/ten thousands repeating

不安定であるが、高い振動数の範囲になると逆の傾向が認められることは注目すべきことといえよう。

#### 4. 結 言

今回行なった実験結果について解析を行ない、種々検討した結果、得られた結論を挙げると、およそつぎのとおりである。

(1) 鉛直、水平振動とも粒体層表面の振動沈下量は振動を加えた初期において急激な大きい沈下を生じ、この沈下は粒子が主として圧縮されることによつて生ずる圧縮沈下が主体をなすものと考えられ、ある程度時間経過後(5~10分)にはほぼ圧縮沈下は終了し、それ以後は流動沈下過程のみとなり、沈下はほぼ直線的に漸増する傾向が認められた。

(2) 一般に本実験の範囲では、鉛直、水平振動とも振動数が大きくなるほど初期ならびに最終沈下量は大きくなり、鉛直、水平振動を比較してみると、振動数の低い範囲(800~1300rpm)では水平振動の方が鉛直振動よりも大きい沈下を生じ、振動数の高い範囲(2000~2300rpm)では逆に鉛直振動の方が水平振動よりも大きい沈下を生ずる傾向がある。もちろん基礎状態によつて多少異なるが、砂層の場合にこのような傾向が顕著である。ただし、碎石、砂とも25cmとした場合は鉛直、水平振動ともほぼ同程度であつた。

(3) 粒体層を水で飽和した場合については、加速度計による加速度の測定は行なわなかつたので、理論を用いた数値的検討はできなかつたが、沈下特性を実験的に検討すると、大略つぎのようである。

大体の沈下特性については、自然乾燥状態の場合とほぼ同様の傾向を示し、ただ沈下量がきわめて大きくなるという点が異なる。それと碎石層50cmの場合には高低振動数の全範囲で水平振動の方が鉛直振動よりも沈下が大きくなつた。基礎状態としては、常識的ながら、碎石50cmの場合が振動沈下量は一番小さく、砂

層の厚さを増加するにつれて、沈下は加速度的に増大し、砂層50cmでは鉛直、水平両振動とも沈下は急増してダイヤルゲージでは測定できず、基礎は破壊状態となつた。

(4) 振動沈下に対する特性値  $A$ 、 $B$  および  $\tan \alpha$  などの値を求めてみたが、これらの値は一般にその値が小さいほど振動沈下に対して安定な基礎であるということができ、基礎の振動沈下に対する安定度を比較するのに利用しうるものと考えられる。しかしながらこれらの値は与えられた基礎に対して一定値とはならず強制力の大きさ、振動数、載荷板の形状寸法などによつて変化するので、同一の条件に対してのみ、その比較が有効となる点に不便がある。しかし振動沈下の現象は多くの要因に影響される複雑な現象であるから、これもまたある程度止むをえないことであろう。

本実験の場合は粒体層をコンクリートわくの中に詰めて実験を行なつたので、わく周辺の拘束の影響がかなり入つていることが予想され、そのため水平振動の場合は特にその影響が著しく現われたものとも考えられるので、わくをさらに拡大したかなり大規模の実験を行なつてみる必要があるものと考えられ、今後さらに検討を進めていく考えである。

終りに本実験に終始協力された神浦一昭君に謝意を表わす次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) 最上幸夫：反復荷重による粒体層の永久変形に関する研究，山口大学工学部研究報告，17, No. 2, 53 (1966)
- 2) 佐藤裕：石質物体の摩擦に与える振動の効果，土木学会誌，39, 24 (1954)
- 3) 上記文献 1)

(昭和43年5月2日受理)