

東大生研 正員 久保慶三郎

○佐藤暢彦

1 概説

構造物の動的解析は多質点系にその構造物を置換して実行されることが多い。そしてその構造物が土中に埋まっている場合には、その土の影響を理想化した考え方により、すなわち動的長値と付加質量という方法で取り扱っている。さらに、地震時の構造物の応答を求めるときには地震力の入力方向問題となる。基礎が浅く剛であれば、その基礎に一樣に地震動を入力してもよいと考えられるが、基礎が比較的深くたわみやすいものであれば、その深さ方向の地震動の違いを考慮しなくてはならない。このことを考え、例えば図-1(a)に示す杭基礎を図-1(b)のようにモデル化して考えてみた⁽¹⁾。すなわち、杭につく土の付加質量を三つの質点に分配し($M_1 \sim M_3$)、その点に杭と地盤との相対変位に比例する反力が作用するようににぎつけた。ここで $Z_0 \sim Z_3$ は各点の地震動の変位を表わしている。

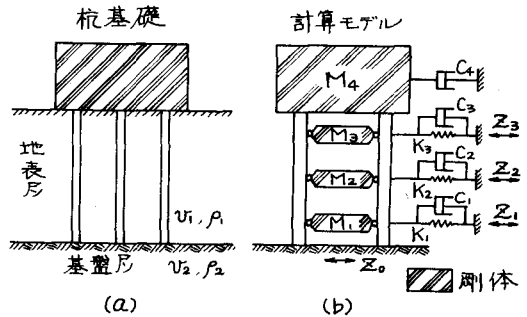


図-1

本文では、この計算モデルについての動的解析法を述べ、実際に図-1(a)のような杭基礎を作って大型振動台⁽²⁾によって実験し、その結果を動的解析によって追跡した結果を紹介する。

2 動的解析法

先づ地表内の地震波の伝播を調べてみると、理論的にはせん断波の反射・屈折理論によって求めることが知られている。基盤面から地表面に垂直に波が入射するとしてこれを $\psi(x)$ 、地表面の厚さを d 、入点の下面からの距離を d_i 、地表面、基盤面のせん断波の伝播速度、定数をそれぞれ v_1, ρ_1, v_2, ρ_2 とすると、入点の伝播地震波 $\psi_2(t)$ は次のように表わされる⁽¹⁾。

$$\psi_2(t) = \frac{2}{1+\alpha} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{1-\alpha}{1+\alpha} \right)^k \left[\psi \left\{ t - \frac{1}{v_1} (2kd + d_i) \right\} + \psi \left\{ t - \frac{1}{v_1} (2kd + 2d - d_i) \right\} \right] \quad (1)$$

ここで $\alpha = \rho_1 v_1 / \rho_2 v_2$ である。いま、 $\psi(t)$ が加速度波であれば $\psi_2(t)$ も加速度波として求められ、この値がすなわち図-1(b)の $Z_0 \sim Z_3$ に相当している。

いま、ある時刻 t において各点の地震動の変位が $Z_0 \sim Z_3$ であり、各質点の杭下端に対する相対変位が $x_1 \sim x_4$ とすれば、D'Alembertの原理を用いて、flexibility coefficient, f_{ij} により次の関係式が得られる。

$$\begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & f_{34} \\ f_{41} & f_{42} & f_{43} & f_{44} \end{pmatrix} x = \begin{pmatrix} -M_1(\ddot{x}_1 + \ddot{Z}_0) - C_1(\dot{x}_1 + \dot{Z}_0 - \dot{Z}_1) - K_1(x_1 + Z_0 - Z_1) \\ -M_2(\ddot{x}_2 + \ddot{Z}_0) - C_2(\dot{x}_2 + \dot{Z}_0 - \dot{Z}_2) - K_2(x_2 + Z_0 - Z_2) \\ -M_3(\ddot{x}_3 + \ddot{Z}_0) - C_3(\dot{x}_3 + \dot{Z}_0 - \dot{Z}_3) - K_3(x_3 + Z_0 - Z_3) \\ -M_4(\ddot{x}_4 + \ddot{Z}_0) - C_4(\dot{x}_4 + \dot{Z}_0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix}$$

ここに $\dot{\mathbf{i}} = [1, 1, 1, 1]$, $K_4 = 0$, $\mathbf{z}_4 = 0$ といて簡単に表わせば,

$$\mathbf{F} - \mathbf{M}(\ddot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{z}}_0 \dot{\mathbf{i}}) - \mathbf{C}(\dot{\mathbf{x}} + \dot{\mathbf{z}}_0 \dot{\mathbf{i}} - \dot{\mathbf{z}}) - \mathbf{K}(\mathbf{x} + \mathbf{z}_0 \dot{\mathbf{i}} - \mathbf{z}) = \mathbf{X} \quad \text{--- (2)}$$

となり, いくらかの変形をすれば次のようになる。

$$\ddot{\mathbf{y}} = -\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{F} + \mathbf{K})\mathbf{y} - \mathbf{M}\dot{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{y}} - \mathbf{g}(t) \quad \text{--- (3)}$$

$$\text{ここで } \mathbf{y} = \mathbf{x} + \mathbf{z}_0 \dot{\mathbf{i}} - \mathbf{z} \quad \text{--- (4)}$$

$$\mathbf{g}(t) = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{F}^{-1}(\mathbf{z} - \mathbf{z}_0 \dot{\mathbf{i}}) + \ddot{\mathbf{z}} \quad \text{--- (5)}$$

結局 (3)式を $\mathbf{g}(t)$ という強制力下にベクトル $\mathbf{y}$ について解き, (4)式によって変位ベクトル $\mathbf{x}$ に変換してやれば応答が算出できる。(3)

3. 大型振動台による実験⁽²⁾

実際に実験した基礎は 9 本の $\phi 100^{\text{mm}}$ のアルミニウムパイプ (肉厚 1.5^{mm}) を 3 行 3 列に 42^{cm} 間隔で並べた群杭基礎である。そして杭下端は基礎層に相当する振動台に固定され, 上端は 4.5^{t} のコンクリートブロック下面に固定されている。地床層としてはシンダーサンドと油を 8:2 の重量比で混合したもので, その性質は単位体積重量が $1.2^{\text{t/m}^3}$, 三軸せん断試験で $C = 0.04^{\text{kg/cm}^2}$, $\phi = 23^\circ$ である。図-2に

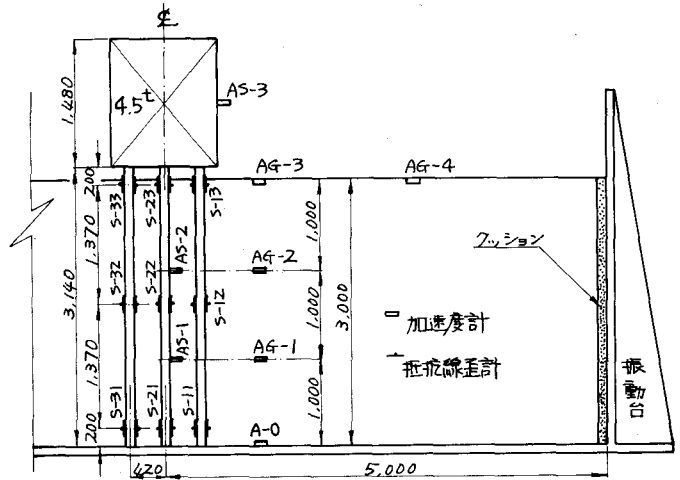


図-2

基礎構造の概略と計器の配置を示した。

先づ振動実験の前にコンクリートブロックを水平にジャッキで押し、静的にブロックの変位、杭内の曲げ応力を測定した。この結果が図-3, 4である。

振動実験は

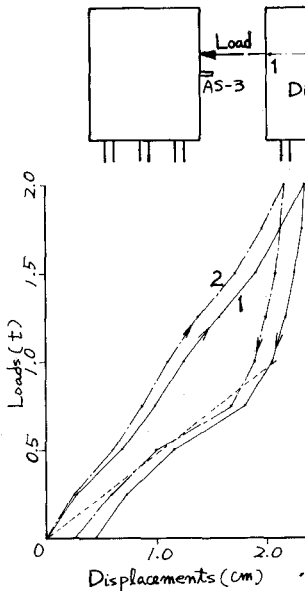


図-3

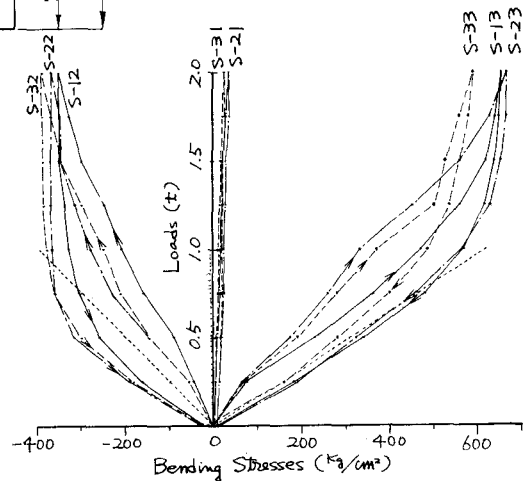


図-4

振動台の振動数を変化させて、地盤内および基礎構造の加速度分布と杭の曲げ応力分布を測定した。測定結果は振動数による特性をみるために振動台の加速度(A-0)が $100g^d$ となるように整理した。その結果が図-5.6である。

この結果から、(1)この基礎は約 1.65° で共振している。(2) 6° 以下では地盤加速度はほぼ一緒であるが 10° に近づくにつれて地表近くは加速度は増大して 10° で約2倍になっている。これは地盤が共振に近づいたもので $14 \sim 15^\circ$ に共振点があるものと推定される。(3)曲げ応力については、杭基礎の共振時にはその分布が静的実験結果と類似して

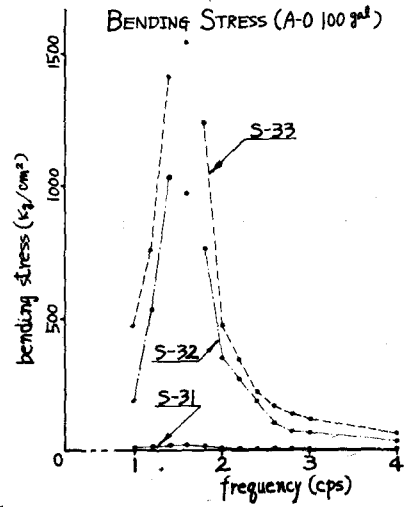
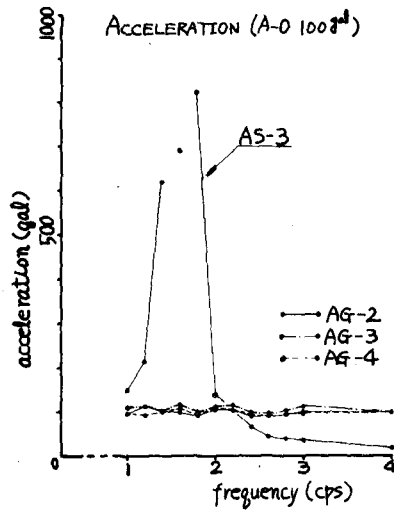


図-5

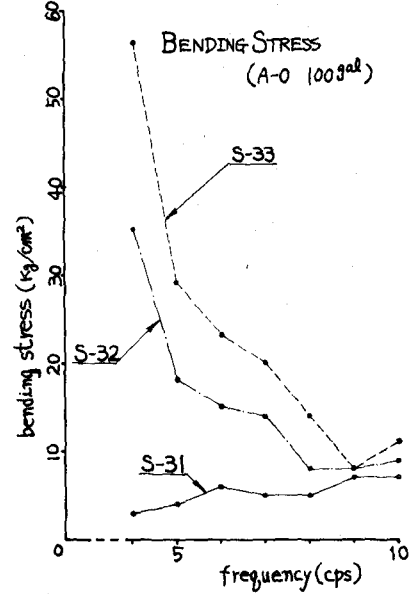
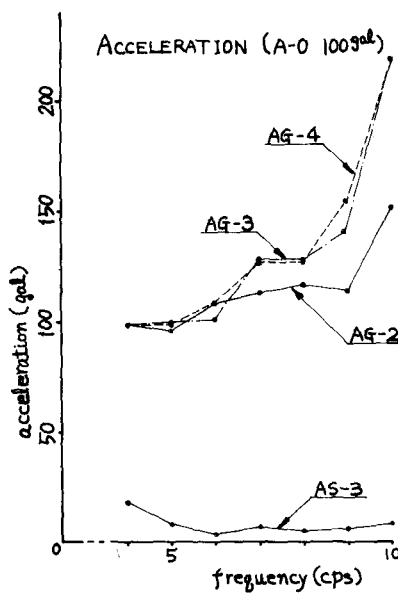


図-6

いるが、 10° に近づくにつれて一様な分布になる。(4)位相はS-31、S-33とS-32とで違っていた。これは 10° 近くでは両端固定、杭を水平に押したときの曲げ応力分布に類似している。これは土が杭を押していると考えられる。

4. 動的解析による実験結果の検討

オに地盤内水平方向定数とオ、深さ方向の分布を調べる。この杭基礎構造を先述の方法でモデル化し、図-3.4の結果が得られるようにバネ定数 k の大きさをtrialで決定した。その結果が図-7であり、また図-3.4にそれを出点線を示した。

オ2に地盤内加速度分布である。図-8は 7° における測定値とせん断波の伝播理論による解を比

較したものである。こゝに示すは全く定性的に異なるものとなり、こゝより地盤が簡単に反射・屈折で説明できないものでないかと考えらる。ここで実験結果から地表付近の加速度分布を定率振動では式で表わさうとした。

$$a_L = a_0 \left\{ 1 + \frac{\omega^2}{p^2 - \omega^2} \left(\frac{d_L}{d} \right)^2 \right\} \text{----- (6)}$$

こゝで a_L は L 点の加速度振幅、 p, ω は L 点を固有振動数、強制振動数である。

こゝ (6) 式による $p^2 = 7895 (14.1 \text{ cps})^2$ としたときの結果が図-8の破線である。

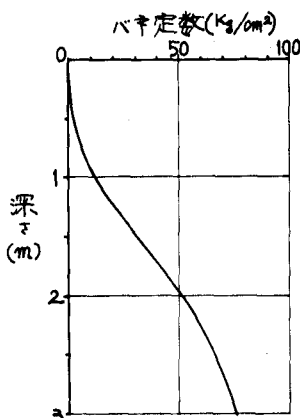


図-7

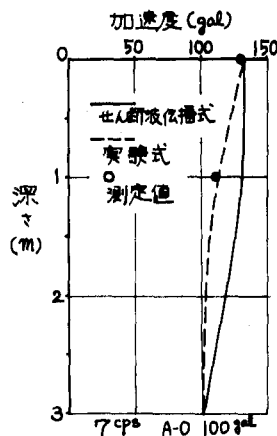


図-8

次に土の付加質量である。群杭間(84×84cm)に含まれる土の質量に対する付加質量の比を β で表わして、種々の β の値について各振動数における応答を求めてみた結果が図-9である。この図によれば、1~4 cps では β の影響ははっきりしないが、6~10 cps でははっきりと出てくる。これは例えば、 $\beta = 100\%$ の場合は二次振動が 11 cps の固有値をもつために応答の中に大きくこの二次振動が含まれてきており、測定結果ではこの現象をみることができない。つまり、 $\beta = 0 \sim 10\%$ と考えた方が測定結果をよく説明できる。

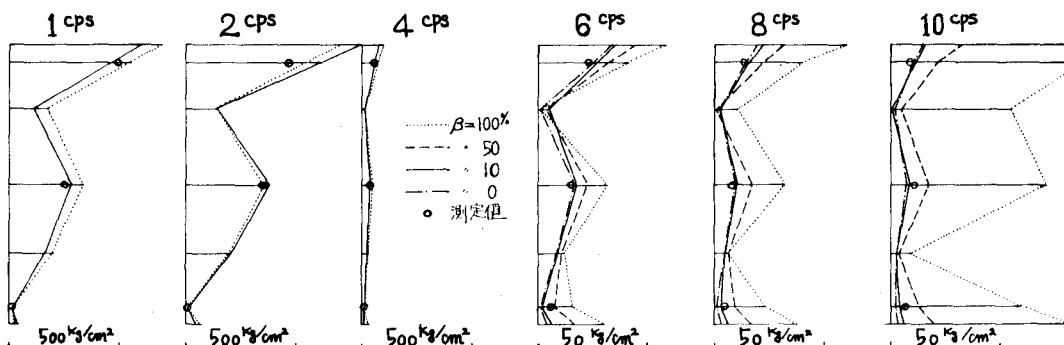


図-9

参考文献

(1) 後藤尚男・亀田弘行：杭基礎上の橋脚の地震時応答について、

土木学会論文集，オ131号 昭41.7

(2) 久保彦三郎・佐藤暢彦：杭基礎をもつ構造物の耐震性

生産研究 オ20巻 オ4号 昭43.4

(3) 久保彦三郎・佐藤暢彦：連続構造物の応答計算への試案

オ22回土木学会年次学術講演会要旨 I-149