

九州大学 正員 ○園 田 敏 矢

九州大学 正員 小 坪 清 真

九州大学 正員 鳥 野 清

1). まえがき

杭によって支持された構造物の地震時ロッキング振動を解析する場合には、杭頭の水平方向復元力ばかりでなく、その鉛直方向復元力の特性を明らかにしなければならない。本研究は支持杭の鉛直方向復元力の特性と模型実験によって調べるとともに、杭と地盤の連成振動として求められた理論解析結果と比較して、その特性を明らかにしようとしたものである。

2). 模型実験

実験概要図を図-1に示す。模型杭として直径60mmの塩ビパイプを使用した。単杭では起振しにくいので4本の群杭とし、また群杭効果が生じないように杭間隔を十分に取って約30cmとした。頂板に歪リングを介して起振機を設置し、頂板に取り付けたサーボ加速度計(明石製作所製、容量±3G、感度3.03V/G)により頂板の上下加速度を測定し、 ω で除しその変位を求めた。基盤として100cm×100cm、厚さ20cmのコンクリート床版を打設し、床版の動きを調べるために、底板にもサーボ加速度計を設置した。歪リング、サーボ加速度計の出力の記録と同時に、オシロスコープの横軸に頂板のサーボ加速度、縦軸に歪リングの歪を入力して、ヒステリシス曲線を描かせた。このヒステリシス曲線より減衰係数と反力係数の振動数特性を求めた。起振力は振動数に対して一定に保った。

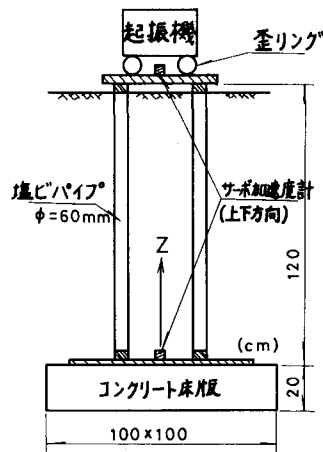


図-1

3). 実験結果

減衰定数 c と反力係数 k は、図-2のヒステリシス曲線から次のようにして求めることができる。この系の運動方程式は

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = P_0 \cos \omega t \quad (1)$$

と表わせる。ここで、この解を $y = D \cos(\omega t - \phi)$ として(1)式に代入し、

$$D = \frac{P_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + \omega^2 c^2}} \quad (2)$$

が求まる。 $c\dot{y}_{max}$ を、オシロスコープの写真から求め、 $c\dot{y}_{max} = c\omega D$ より c を各振動数について求める。しかし $c\dot{y}_{max}$ にはサーボ加速度計の位相遅れが含まれているので補正を行った。(2)式を変形して、

$$k = \sqrt{\left(\frac{P_0}{D}\right)^2 - \omega^2 c^2} + m\omega^2 \quad (3)$$

が求まる。以上のようにして c と k が求まる。各振動数に対して減衰係数 c の変化を表わしたものが図-3である。図から判るようにほぼ一定である。また、振動数に対する k の変化は図-4に示してある。基盤の動きをチェックするために底板に設置したサーボ加速度計の測定値は杭頭のそれに比して10%程度であった。

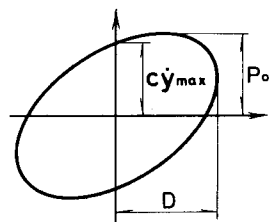


図-2

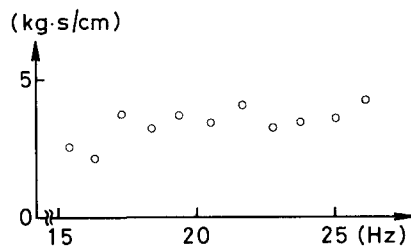


図-3 杭1本当りの減衰係数の変化

4). 理論解析

解析を行うに当り次のような仮定を設けた。

- (イ) 杭は完全弾性体で鉛直になっていて先端固定である。杭の断面は円形で、完全に土と接している。
- (ロ) 土の自由表面において、各種応力は働かない。土は等質、等方性である。
- (ハ) 杭の水平変位は無視できるほど小さい。近似解として地盤の半径方向変位を無視して行った。

三次元波動論より、地盤の変形は次の式で求まる。

$$\mu \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{\mu}{r} \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{r}{g} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = 0 \quad (4)$$

ここで、 w は z 方向（鉛直方向）の変位、 μ 、 λ はラメの常数、 r は単位体積重量、 g は重力加速度である。いま、 z 方向の変形をフーリエ級数で展開し、 $w = R(r) \sin\left(\frac{n\pi z}{2H}\right) \cdot e^{ipt}$ において、(4) 式に代入すると

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} - \left\{ \frac{\lambda + 2\mu}{\mu} \left(\frac{n\pi}{2H} \right)^2 - \frac{r p^2}{g \mu} \right\} R = 0 \quad k_n = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\mu} \left(\frac{n\pi}{2H} \right)^2 - \frac{r p^2}{g \mu}} \quad (5)$$

となる。この解は変形Bessel関数で与えられる。（但し、 k_n が実数の場合）また、 $r \rightarrow \infty$ のとき $I_0(k_n r) \rightarrow \infty$ となるので、 $R = A_n K_0(k_n r)$ となる。次に、粘性を考慮しない場合の単杭—地盤系の振動方程式は次式で示される。

$$\frac{w_0 A}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = EA \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} + q_1(z) + q_2(z) \quad (6)$$

ここで、 w_0 は杭材料の単位体積重量、 A は杭の断面積、 E は杭材料のヤング率、 y は杭の軸方向変位、 $q_1(z)$ は杭に働く軸方向外力、 $q_2(z)$ は杭周面地盤反力である。杭頭荷重（上向き正）を $\sin\left(\frac{n\pi z}{2H}\right)$ の級数に展開すると、 $q_1(z)$ は杭頭のみで与えられているという条件より求まり、 $q_1(z)$ 、 $q_2(z)$ はそれぞれ次のように表わされる。

$$q_1(z) = \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{2P}{H} (-1)^{\frac{n-1}{2}} \sin\left(\frac{n\pi z}{2H}\right) e^{ipt} \quad (7)$$

$$q_2(z) = \pi d G \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)_{r=r_0} = \pi d G \sum_{n=1,3,5,\dots} A_n K'_0(k_n r) \sin\left(\frac{n\pi z}{2H}\right) e^{ipt} \quad (8)$$

ここで、 d は杭の直径、 G は地盤の剛性率、 r_0 は杭の半径、また、 $K'_0(k_n r) = -k_n K_1(k_n r)$ である。杭変位を、

$$y = \sum_{n=1,3,5,\dots} D_n \sin\left(\frac{n\pi z}{2H}\right) e^{ipt}$$

において、(7) 式、(8) 式と共に (6) 式に代入し、また、 $r=r_0$ において、 $y=w$ となる境界条件を用いると、次のように杭変位が求まる。

$$y = \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{2P(-1)^{\frac{n-1}{2}} \sin\left(\frac{n\pi z}{2H}\right) e^{ipt}}{\left\{ EA \left(\frac{n\pi}{2H} \right)^2 - \frac{w_0 A p^2}{g} \right\} - \pi d G \frac{K_0(k_n r_0)}{K_0(k_n r_0)}} H$$

図-4の実線は G の値を 100 kg/cm^2 、 150 kg/cm^2 、 200 kg/cm^2 とした場合の杭頭反力係数の理論値である。また、 S 波速度から地盤の G を求めると、 $160 \sim 200 \text{ kg/cm}^2$ が得られた。杭のみの反力係数は本模型の場合、 693.4 kg/cm^2 である。

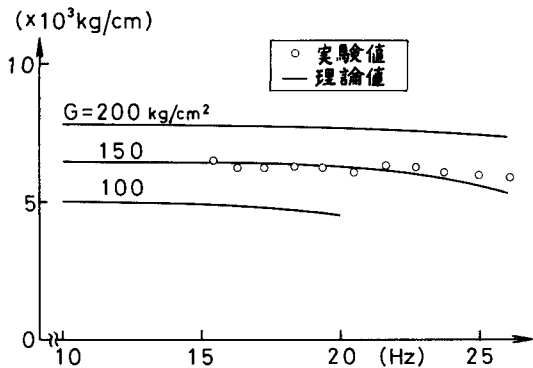


図-4 反力係数の変化

参考文献: T. Nogami & M. Novak; SOIL-PILE INTERACTION IN VERTICAL VIBRATION, E.E. & S.D., VOL.4, NO.3