

弾塑性地盤中にある杭の水平振動について

京都大学工学部 正員 後藤尚男
 京都大学工学部 正員 土岐憲三
 京都大学工学部 正員 ○秋吉 卓

1 まえがき われわれはこれまで沖積層のような軟弱な地盤の応力とひずみの非線型性が、振動時の地盤の応答にいかなる影響を与えるかということを検討してきたが、今回はかかる軟弱な地盤の非線型振動が杭の振動にいかなる影響を及ぼすかを検討しようとした。このため杭を分布質量系に置換するとともに、地盤の変形を考慮に入れて杭および地盤の残留変形ともあわせ考究の対象にした。

2 地盤および杭の抽象 図-1のごとく軟弱な地盤が堅固な基盤に支えられている場合を考える。この軟弱な地盤の厚さを H とし、これを n 等分割して杭の質量が各層の中心に集中しているものとする。杭の集中質量は各点とも w , 質量相互間の剛性は EI とすると杭の運動方程式はつぎのように書ける。

$$\ddot{v} + K(v - u) + rCm = -\ddot{e}i \quad (1)$$

ところで杭の各質点に作用するモーメント m と各質点の変位 v との間には次の関係がある。

$$Am = \alpha Bv \quad (2)$$

したがって式(2)と式(1)に用いると、

$$\ddot{v} + K(v - u) + \beta Gv = -\ddot{e}i \quad (3)$$

ここで $\ddot{v}$, v , m , u はそれぞれ杭の加速度ベクトル、変位ベクトル、モーメントベクトルおよび地盤の変位ベクトルを表わし、いずれも n 次の列ベクトルである。

$\ddot{e}$ は基盤の加速度で i は単位列ベクトルを表わす。また行列 K は地盤と質点との間のバネ定数の分布で $(n \times n)$ 次の対角行列である。行列 A , B , C は杭下端でヒンジおよび杭上端で自由という境界条件を考慮した $(n \times n)$ 次の次のような行列である。

$$A = \begin{bmatrix} 3 & 1 & & 0 \\ 1 & 4 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & 1 & 4 & 0 \\ & & & & 1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 3 & -1 & & 0 \\ -1 & 2 & -1 & \\ & & \ddots & \\ 0 & & -1 & 2 & -1 \\ & & & & 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 3 & -1 & & 0 \\ -1 & 2 & -1 & \\ & & \ddots & \\ 0 & & -1 & 2 & -1 \\ & & & & -1 \end{bmatrix}, \quad \text{ただし}$$

$$\alpha = \frac{6EI}{(H/n)^2}, \quad \beta = \alpha r, \quad r = \frac{1}{(H/n)(w/g)}$$

$$G = CA^T B, \quad k_i = \frac{K_i d (H/n)}{(w/g)}$$

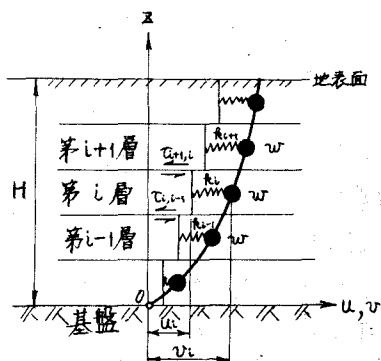


図-1 抽象化した地盤と杭

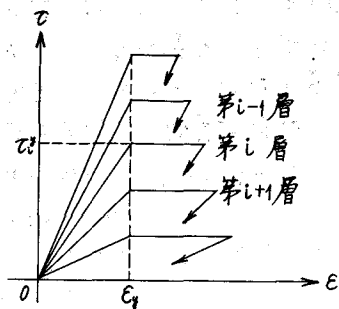


図-2 地盤の応力-ひずみ図

なお K_i は第 i 番目の負点と第 i 層の地盤との間のバネ定数で深さ方向に三角形分布、 d は杭の外径、 w は各点の集中重量、 g は重力加速度、 H は軟弱地盤全体の厚さを示す。

また一方地盤の振動が杭に影響を及ぼしても杭の振動は地盤に影響を及ぼすことなく、かつ地盤はせん断振動のみを行なうものとする、次のような地盤の運動方程式が書かれる。

$$\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{SD}\mathbf{u} = -\ddot{\mathbf{e}} \quad (4)$$

ただし $\ddot{\mathbf{u}}$, $\mathbf{u}$ はそれぞれ地盤の加速度ベクトルと各層に働くせん断応力ベクトルを表わし n 次の列ベクトルである。また行列 $\mathbf{D}$ は各層に働くせん断応力の分布を示す行列で次のような $(n \times n)$ 次の行列である。

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ & 1 & -1 & \dots & 0 \\ & & 1 & -1 & \dots & 0 \\ & & & 1 & -1 & \dots \\ 0 & & & & 1 & -1 \end{bmatrix}, \text{ ただし } \delta = \frac{1}{\rho(H/n)}$$

なお境界条件として、基盤面と地表面においてそれぞれ $u_0 = 0 (z=0)$, $u_{n+1,n} = 0 (z=H)$ を上記行列 $\mathbf{D}$ に考慮した。

対象とした地盤のせん断応力 $\tau_{i,i+1}$ と各層間の相対変位から算出されるひずみ ε_i との関係は、図-2 のような弾塑性特性を持つものとした。さらに各層間のせん断強度は密度 ρ と深さに比例するものと考え、第 i 層と第 $i+1$ 層との間のせん断強度 $\tau_{i,i+1}$ は $\tau_{i,i+1} = \alpha \rho H$

$\times (n+i-1)/n$ と表わした。さらに地盤の含水比や内部摩擦角などのいわゆる地盤の種類を考慮したパラメーター α を導入した。

3 数値計算例 計算を実施するにあたって、 $H=20\text{m}$, $n=5$, 密度 $\rho=1.5 \times 10^3 \text{kg/cm}^3$, $\alpha=0.05, 0.1, 0.2, 0.4$, 降伏ひずみ $\varepsilon_y=0.5, 1, 2\%$, $K_i=0.1 \sim 5 \text{kg/cm}^2$, また杭は鋼管杭でその外径は $30 \sim 60\text{cm}$, 肉厚 $3 \sim 10\text{mm}$, 入力としては正弦波を与えて最大加速度を 350gal にとりその周期を変化させた。ここでは一例として $\alpha=0.4$, $\varepsilon_y=0.5\%$, 杭の外径 30cm , 肉厚 3mm , $K_i=5 \text{kg/cm}^2$, 杭内中空で入力正弦波の周期が 0.6sec の場合における解析結果の一部を図-3, 図-4 に掲げた。数値計算は京都大学電子計算機 KDC-II による。

4 考察 この例のごとく降伏しやすい軟弱な地盤では、上層になるほど降伏している時間が長くなり、したがって上層の地盤ほどすべりによる変形が大きく、それだけ層間の位相差は大きくなる。このような軟弱な地盤中にある比較的軽い杭は地盤の変形の影響を受けて、位相差の増大に伴って杭の上部に非常に大きな曲げモーメントを生ずる場合のあることが図-3, 図-4 より知られる。かくして軟弱な地盤中に打設された杭は地震時には地盤の流動化にともない大きな変形を起こす可能性がある、耐震設計において十分注意されねばならない。その他の結果と考察は講演時にゆずる。

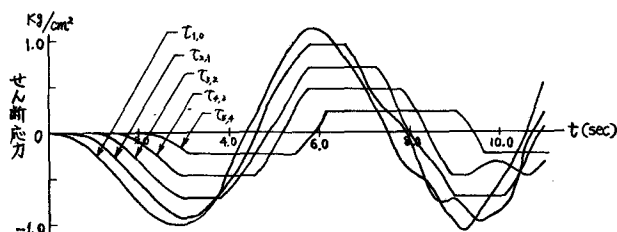


図-3 各層間のせん断応力の応答

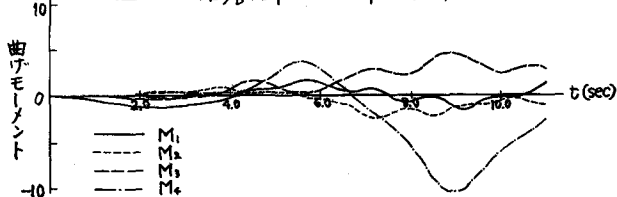


図-4 各点の曲げモーメントの応答