

岡山大学工学部 正員 ○竹宮 玄和
 京都大学工学部 正員 山田 善一
 京都大学大学院 学生員 野田 茂

1. まえがき

最近、軟弱地盤上に杭基礎をもって土木構造物が建設される傾向にある。本研究は、かかる深い杭基礎を有する高橋脚橋の地震時動的性状を理論的に把握することを目的とするもので、今回の内容は表層地盤-杭基礎-上部構造の橋軸直角方向の連成振動を、基盤面での調和入力のもとに Substructure 法から解析した。杭基礎のインピーダンス関数の算出には波動論解を採用した。

2. 解析

上記構造物の解析モデル化を図1に示したように、杭は横振動ならびに縦振動をする弾性ばりで、上下端においてそれぞれ2自由度の剛体フーチングと基盤に剛結されているものとし、ピア-および桁部である上部構造をFEMで多自由度系に置換する。

解析手法は、まず単杭のインピーダンス関数を求めることから始まる。これには、

杭の横振動方程式ならびに縦振動方程式を、地盤反力を考慮に入れて解く。表層地盤を一樣な弾性体あるいは粘弾性体とみなし、杭と地盤が完全密着した運動をすると仮定したときの調和振動解は既に田治見²⁾ Novak & Nogami²⁾ によって発表されている。地盤が層状を形成している状態下では、同一仮定の下にトランスフォーマトリックスを適用すればよい³⁾。その結果、杭頭での断面力と変位との関係は、一般に

$$\begin{Bmatrix} Q \\ M_p \\ N_p \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_p I_p}{H} F_{xx} & \frac{E_p I_p}{H} F_{xy} & 0 \\ \frac{E_p I_p}{H} F_{yx} & \frac{E_p I_p}{H} F_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E_p A_p}{H} F_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_p \\ \theta_p \\ W_p \end{Bmatrix} = [K_{pk}] \begin{Bmatrix} U_p \\ \theta_p \\ W_p \end{Bmatrix} \quad (1)$$

但し、 E_p は杭のヤング率、 I_p は断面2次モーメント、 A_p は断面積である。さらに $[K_{pk}]$ は複素数となるので、これを等価バネ剛性と等価粘性係数の形で評価する。図2.aは F_{xx} のそれらを無次元振動数 $\alpha_0 = \frac{\omega r_0}{V_s}$ に対して描いたものである。 r_0 は杭の半径、 V_s は表層地盤のせん断波速度を表す。また D は地盤の内部減衰率で、粘弾性体の複素数Lamé定数の実部に対する虚部の比で導入した。強震時には $D=0.2 \sim 0.4$ ぐらいにまでなるといわれている。同図にはBaranovの平面歪解も入っている。これは、地盤の固有せん断振動を無視したときの水平方向の放射波のみに対して得られるものである。三次元解では $\alpha_0 < 0.3$ の範囲で地盤の固有せん断振動の影響で落ち込みが見られる。しかし、 $\alpha_0 > 0.3$ では両者の差はほとんど無い。また、等価剛性、等価粘性係数の振動数依存性も極めて小さい。他のインピーダンス関数についても同様な傾向である。図2.bは単杭の縦振動についてのものを表す。

群杭およびフーチングをもって杭基礎を構成した場合の地盤との連成振動を、上載加振下で考える運動方程式は、

$$-\omega^2 \begin{Bmatrix} M_F & 0 \\ 0 & J_a \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} U_c \\ \theta_c \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -Z_g \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} R_x \\ R_p \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ R_{\omega} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Z_g & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q(t) \\ M(t) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

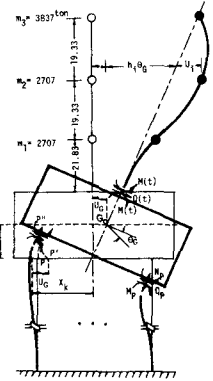


図1. 解析対象モデル

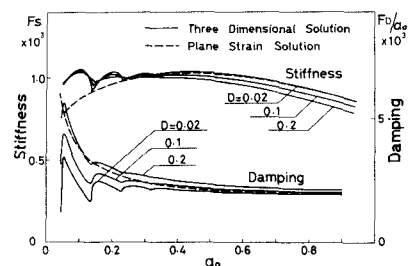


図2.a. 杭の横振動のインピーダンス, F_{xx}

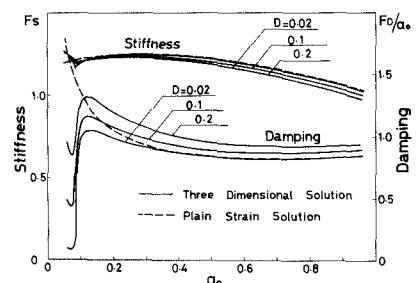


図2.b. 杭の縦振動のインピーダンス, F_z

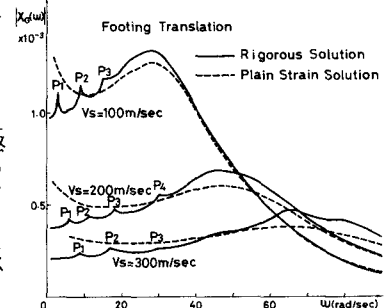


図3. 上載加振による杭基礎の共振曲線
 $Q(t) = 948 \cdot e^{i\omega t}$ $M(t) = 41278 e^{i\omega t}$

但し、 M_g はフーチングの質量、 J_g はその重心に関する質量慣性モーメント、 R は杭からの反力で、式(1)のインピーダンス関数と、各杭の接合されているフーチング底面の変位とその重心の変位との関係
$$\begin{Bmatrix} U_p \\ \theta_p \\ W_p \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -Z_g & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & Z_g & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_g \\ \theta_g \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$
 U_g は重心の並進量、 θ_g はその回転量

より計算される。図3は並進についての共振曲線を示したもので、地盤反力の算定に使用した三次元解と平面歪解との差は、大きな卓越ピークに至るまでの低振動数領域に現われてくる。前者の小さなスパイク R_1 は表層地盤の固有せん断振動を反映したものである。同図より、これらは第2次的な量で杭基礎系としての固有振動が支配的となっていることが重要である。そして卓越振動数は、せん断波速度とともに高くなるが、平偏な形へと移る。全体的な傾向は、平面歪解は三次元解に比して減衰効果を多少過大評価しているほか、差はわずかである。このことは、杭基礎の上載加振によっては、表層地盤の連成振動はあまり誘発されないことを示唆している。

次に基礎入力を考えたときの定式化であるが、このときの杭へ作用する地盤反力算定は、表層地盤そのものも変形するので上の結果を踏まえて杭と地盤の連成を無視して一般に、

$$P(z) = (S_1 + iS_2) \cdot [U_p(z) - U_g(z)] \quad (4)$$

と表わす。すなわち、杭と地盤のみのときの変位の差に比例する。 $(S_1 + iS_2)$ は複素バネ効果を表わしている。 U_g については、一次元波動方程式から求まる。よって杭基礎の運動方程式の反力のうち、式(2)の右辺第2項にはこれによる効果が入ってくるので注意を要する。

上部構造の加わった全体系の解析は、Substructure法を適用する。すなわち、定式化は上部構造、杭基礎系それぞれ独立に行ない、フーチングの頂面での断面力の連続条件で両者を接合する。手法は文献(4)に示したとおりであるのでここでは省く。図4は単位の大きさの加速度入力に対する基礎の共振曲線で、地盤反力算定の三次元解と平面歪解は第2次ピークを除いては両者は接近した値を与えている。そして $D=0.2$ になると、これも近づいてくる。杭基礎系のとときと比較すると、1次と3次のピークは地盤の固有せん断振動で、2次は杭基礎と上部構造を合わせた構造物系のものであることが判かる。後者は杭のインピーダンス関数に、杭基礎系の卓越振動数での値を採って得られる定数係数の全体系の複素固有値解析から理由付けられる。

計算例の諸元 地盤： $\rho=2.0 \text{ t/m}^3$, $\nu=0.3$, $H=52 \text{ m}$, 杭($5^* \times 5^*$)； $r_0=1.5 \text{ m}$, $A_p=4.52 \text{ m}^2$, $I_p=3.46 \text{ m}^4$, $E_p=2.1 \times 10^6 \text{ t/m}^2$, $H=52 \text{ m}$
フーチング($36^* \times 36^* \times 5^*$)； $W_F=1.35 \times 10^4 \text{ t}$, $J_g=1.486 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{m}^2$, $Z_g=2.5 \text{ m}$, $\Gamma=4.717 \text{ m}^4$, $E=2.1 \times 10^6 \text{ t/m}^2$

参考文献

- (1) Tajimi, H.: "Dynamic Analysis of a Structure Embedded in an Elastic Stratum", Procs. of 4 WCEE, Vol. 3, 1969, pp. 53-69
- (2) Novak, M. & Nogami, T.: "Soil-File Interaction in Horizontal Vibration", Int. J. on Earthq. Eng. & Struc. Dyn. Vol. 5, 1977, pp. 263-281
- (3) 山田, 竹吉: 片岡: 軟弱地盤-杭基礎-構造物系の動的相互作用に関する研究報告第2号, 昭和53年, I-35.
- (4) Yamada, Y., Takemiya, H. & Kawano, K.: "Random Response Analysis of a Nonlinear Soil-Suspension Bridge Pier System", Int. J. on Earthq. Eng. & Struc. Dyn. (to appear in Vol. 6)

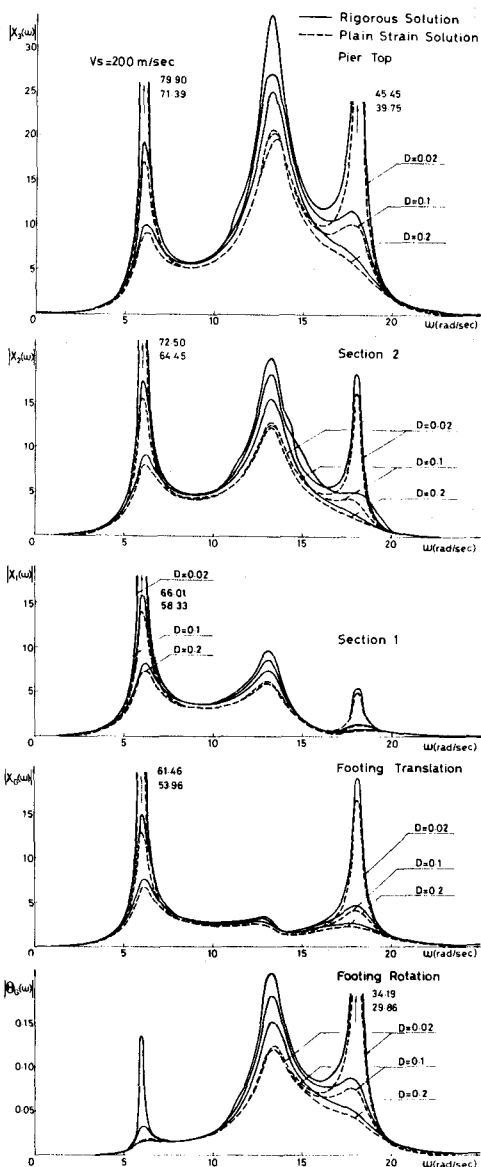


図4. 基礎入力による全体系の応答共振曲線
図4. 基礎入力による全体系の応答共振曲線。そして $D=0.2$ になると、これも近づいてくる。杭基礎系のとときと比較すると、1次と3次のピークは地盤の固有せん断振動で、2次は杭基礎と上部構造を合わせた構造物系のものであることが判かる。後者は杭のインピーダンス関数に、杭基礎系の卓越振動数での値を採って得られる定数係数の全体系の複素固有値解析から理由付けられる。