

1. まえがき

最近は、地理的条件から高橋開橋が軟弱地盤上に深い杭基礎をもって建設される傾向にある。かかる構造物の地震時挙動の解明には、地盤・構造物系の動特性ならびに地盤振動の両者を考慮せねばならない。今回の報告は、前回に発表¹⁾した一様表層地盤解析を伝達マトリックス法を適用して多層地盤解析に拡張したものである。解析対象系を図1及び表1に示す。

2. 定式化

単杭解析: 表層地盤内の杭の解析は、横振動と縦振動を独立させている。いま、基盤面において、地動変位が $u_g = U_g e^{i\omega t}$ のとき、それぞれに対する運動方程式は

$$m_p \frac{\partial^2 u_p}{\partial t^2} + P_T(z, t) + E_p I_p \frac{\partial^4 u_p}{\partial x^4} = -m_p \frac{\partial^2 u_p}{\partial t^2} \quad (1) \quad m_p \frac{\partial^2 w_p}{\partial t^2} + P_L(z, t) - E_p A_p \frac{\partial^2 w_p}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

ここに u_p = 杭の水平変位, w_p = 鉛直変位, $E_p I_p$ = 曲げ剛性, $E_p A_p$ = 軸力剛性, m_p = 単位長質量, $P_i(z, t)$ と $R_i(z, t)$ は周辺地盤からの当該振動形態に対する反力である。この算定には、Tajimi⁽²⁾, Novak & Nogami⁽³⁾ による粘弾性波動論解を採用し、多層地盤に拡張した。このとき j 層内において
$$P_i(z_j) = \sum_{h=1}^N \alpha_{hj} (\alpha_{ij}^P - \alpha_{ij}^S) Z_p(z_j) \quad (3)$$

$$P_L(z_j) = \sum \bar{\alpha}_\ell^P Z_\ell(z_j) \quad (4)$$

$$\alpha_{ij}^P = \pi \Gamma_0 \mu_j \frac{4K_1(q_j r_0) K_1(q_j r_0) + \delta_j \Gamma_0 K_1(q_j r_0) K_0(\delta_j r_0) + q_j \Gamma_0 K_0(q_j r_0) K_1(\delta_j r_0)}{q_j K_0(q_j r_0) K_1(\delta_j r_0) + \delta_j K_1(q_j r_0) K_0(\delta_j r_0) + q_j \delta_j K_0(q_j r_0) K_0(\delta_j r_0)} U_j, \quad \alpha_{ij}^P = -2\pi \Gamma_0 \mu_j (1 + D_{sj}) \frac{q_j K_1(q_j r_0)}{K_0(q_j r_0)} U_j$$

$Z_p(r)$ = 層状地盤の l 次固有振動モード形状, h_l = その振動数, α_j = 地盤のせん断振動における l 次モード定数
 U_j = 枕と密着する地盤の $Z_p(r)$ に展開したときの係数, μ_j = 地盤のせん断弾性係数, θ_{lj} , θ_{sj} = 粘弾性地盤の疲
 軟方程式をポテンシャル関数を使って変数分離したときの定数, D_{sj} = 複数 Lamé 定数の比 μ_j/μ_j^* , $D_{sj} =$
 $D_{lj}(\rho_m \lambda_j^*/\rho_s \lambda_j^*) = D$ と仮定した。横振動については、式(3)を式(1)に代入し、調和振動解 U_p を基底スカラー関
 数とすると、それを考慮したときの解の和で与える。

$$U_p(r_j) = U_p^0(r_j) + U_p^1(r_j) \quad (5)$$

そして

$$U_p(z_j) = U_p^0(z_j) + U_p^g(z_j) \quad (5) \quad \text{そして}$$

$$U_p^0(z_j) = C_1 \sinh k_j z + C_2 \cosh k_j z + C_3 \sinh k_j z + C_4 \cosh k_j z - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\alpha_{ni} U_{pi} z(z_j)}{E_p I_p \left(\frac{p_i}{v_{sj}} \right)^4 - \bar{\omega}_{mp}^2}, \quad U_p^9(z_j) = \sum \frac{\alpha_{ni} \alpha_{sj}^9 + \alpha_{pi}^9 \bar{\omega}_{mp}^2}{E_p I_p \left(\frac{p_i}{v_{sj}} \right)^4 - \bar{\omega}_{mp}^2} z_i(z_j) U_{ji} \quad (6), (7)$$

$\alpha_p^0=1$ を $Z_p(z)$ で展開したときの係数。さて、式(5)より算出される変位(たねみ U_p 、たねみ角 Θ_p) および断面力(曲げモーメント M_p 、せん断力 Q_p) のベクトル $\{U_p(z)\}$ を同一層内の上面と下面でみると

$$\{U_P(0)\}_j - \{U_P^g(0)\}_j = [T]_j (\{U_P(H_j)\} - \{U_P^g(H_j)\}) \quad (8)$$

なる関係がある。ここで $[T]_j$ は伝達マトリックス

を表わし、その要素は式(6)から求まる。枕の導電性を使って、式(8)を枕全長に適用していくと次式が得られる。
$$\{U_p(0)\}_1 = [T^N]\{U_p(H_N)\}_N + \sum_{j=1}^N [T^{j-1}](-[T]_j\{U_p^g(H_j)\}_j + \{U_p^g(0)\}_j) \quad (9)$$
ただし $[T^N] = \prod_{j=1}^N [T^j]$

杭の縦振動についても、式(4)を式(2)に代入した
より $\{W_p(0)\}_i = [\bar{T}]_i \{W_p(H)\}_i$ が得られ、その結果 $\{W(0)\} = [\bar{T}]^N \{W_p(H)\}_N$

ここに $\vec{r}_j = (\omega m_p / \epsilon_p A_p)^{-1/2}$ W_j は杭と密着している地盤変位を $Z_j(x)$ で展開したときの係数, $\{W_j(x)\}$ = 式(10) で与えられる変位 (伸び W_p) と断面力 (軸力 N_p) のベクトルである。

杭基礎構造解析: 群杭および「フーチング」から成る下部構造物の運動方程式は、「フーチング」重心で並進 u_F と回転 θ_F の2自由度系と考えると、 $[M]_F \{\ddot{u}\}_F + [C]_F \{\dot{u}\}_F + [K]_F \{u\}_F = \{F\}_F$ (12) $= \text{二二}$

$[M]_F$ = 質量マトリックスで、フーチング質量 m_F と重心に関する質量回転慣性の対角要素から成り、剛性

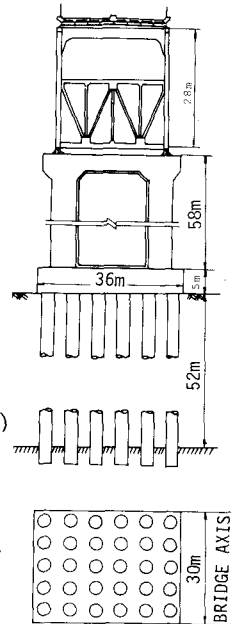


图 1. 解析对象系 5)

減衰マトリックスは $([K]_F + i\omega [C]_F) = \sum_{j=1}^{N_{pile}} [\alpha]_p^T [K_{pile}] [\alpha]_p$ (13)

と各単杭のインセンダンス $[K_{pile}]$ を総合して得られる。また外力項

は $\{F\}_F = [M]_F \{\ddot{u}_g\} + [\beta] \{R\} + [\alpha]_p^T \{F\}_s$ (14)

$[\alpha]_p$ は杭頭変位とフーチング重心変位と、 $[\beta]$ はフーチング天端変位

とその重心変位と結び変換マトリックス、 $\{R\}$ は天端断面力ベクトル

である。 $[K_{pile}]$ と地盤振動に起因する $\{F\}_s$ は、式(9)、(11)より

計算される。すなわち杭先端を固定状態と仮定すると、式(9)の

第2項を $\{D\}$ として

$$\begin{Bmatrix} Q_p(0) \\ M_p(0) \\ N_p(0) \end{Bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} \frac{E_p I_p}{H^3} F_{xx} & \frac{E_p I_p}{H^2} F_{x0} & 0 \\ \frac{E_p I_p}{H^2} F_{x0} & \frac{E_p I_p}{H} F_{00} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E_p A_p}{H} F_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_p(0) \\ \Theta_p(0) \\ W_p(0) \end{Bmatrix}_1 - \begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ 0 \end{Bmatrix} U_g + \begin{Bmatrix} D_3 \\ D_4 \\ 0 \end{Bmatrix} U_g$$

$$= [K_{pile}] \{U_p(0) \ \Theta_p(0) \ W_p(0)\}_1^T - \{F\}_s \quad (15)$$

全体系解析: 運動方程式と動的サブストラクチャー法から立てる。

ヒート部(ガガ部の質量を頂部に付加している)をFEMで多節点

系に置換すると、 $[M]_{sup} \{\ddot{z}\}_{sup} + [C]_{sup} \{\dot{z}\}_{sup} + [K]_{sup} \{z\}_{sup} = \{0\}$ (16)

ここに $[M]_{sup}$, $[C]_{sup}$, $[K]_{sup}$ はそれぞれ質量、減衰および剛性

マトリックス、 $\{z\}_{sup}$ = フーチング天端に対する相対変位、 $\{z\}_{sup}$ は

絶対変位 $\{z\}_{sup} = \{z\}_{sup} + [\delta] \{U\}_F + \{1\} U_g$ (17)

そして $[\delta]$ はフーチング変位のヒート部へ寄与変換マトリックスである。

式(12)、(16)の連成振動は $[\beta]^T \{R\} = -[\delta]^T [M]_{sup} \{\ddot{z}\}_{sup}$ (18)

を用いて得られる。

3. 解析結果

地盤振動解析に固有モード展開を採ったが、その精度を重複反射

理論解と比較したのが図2である。使用モード数は最初の30である。

本解析では、表層地盤内の波動伝播のみを扱っているが、現実

には表層から基盤への反射波の透過もあり、そのときは同図の細線

となる。これは各層において、 $D=0.3$ の等価減衰となっている。実

際の地震動を対象とする場合は、フーリエ解析を通して U_g に波動の

地下伝散を含めた基盤面の $U_g(\omega)$ を採用すればよい。図3は、杭基

礎構造のみの応答倍率曲線、図4は全体系のそれである。同図には

地盤反力の算定において平面歪解(地盤のせん断振動を考慮しない)

を使用したときの結果も合わせて描いている。応答を各断面で観測すると、下部構造部分は大きく地盤振動に支配されているが、上部構造部分ではヒート頂になるにつれて地盤-構築物系の振動が現われてくる。前回の一樣地盤では、内部減衰が大きくなって $D=0.4$ 程度だと、平面歪解は3次元解を十分に近似できたが、今回の地盤では、地盤-構築物系の卓越振動において3次元解の方がわずかにある位高く、地盤振動も多少鋭敏に反映されて出ている。

表1. 地盤特性⁵⁾

SURFACE LAYER	DEPTH H_j (m)	SHEAR VELOCITY V_{sj} (m/sec)	UNIT WEIGHT ρ_j (t/m ³)	DAMPING $D_j=2\zeta_j$
1	2.5	84	2.05	0.332
2	5.7	56	2.05	0.608
3	4.0	172	1.85	0.154
4	2.6	205	2.05	0.210
5	3.3	253	1.90	0.134
6	6.3	184	1.90	0.168
7	7.0	269	2.10	0.202
8	9.2	315	2.20	0.188
9	6.0	326	1.90	0.138
10	7.0	484	1.90	0.110
BEDROCK		800	2.20	0.098
HALFSPACE				

図2. 地表面応答

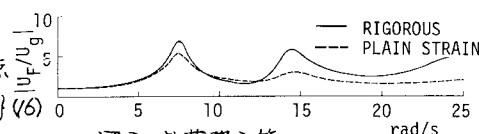


図3. 杭基礎応答

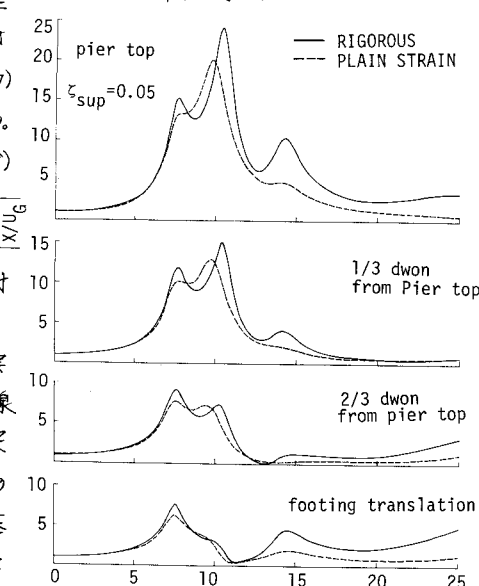
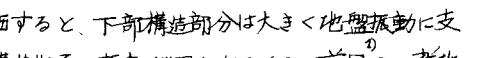


図4. 全体系応答



参考文献

- (1) 竹宮山田野田: 地盤 杭基礎 上部構造物の動的相互作用について, 第33回土木学会年次学術講演会概要集 I-220, 1978
- (2) Tajimi, H.: Dynamic Analysis of a Structure Embedded in an Elastic Stratum, Procs. 4th WCEE, Vol.3, 1969, pp.53
- (3) Nogami, T. & Novak, M.: Soil-Pile Interaction in Vertical Vibration, Int. J. Earthq. Eng. & Struc. Dyn., Vol.4, 1976, pp.277-293 (4) Novak, M. & Nogami, T.: Soil-Pile Interaction in Horizontal Vibration, Int. J. Earthq. Eng. & Struc. Dyn., Vol.5, 1977, pp.263-281 (5) 土木学会高橋脚橋梁設計委員会: 高橋脚橋梁の耐震設計に関する調査研究報告書 昭和52年3月