

岡山大学 工学部 正員 竹宮宏和
 岡山大学 大学院学生員 小松洋海
 日本道路公団 正員 角谷 務
 日本技術開発(株) 正員 佐伯光昭

1. まえがき

著者らは、地震時の杭基礎構造物の応答性状を明確に把握して、その知見を設計へフィードバックする目的から、特に杭と地盤との動的相互作用解析システム(GPILE)の開発に従事してきた。今回は、解析の主眼を群杭構造物の杭頭インピーダンスの評価に置き、同システム内における各解析手法の比較検討を行った。また、最近、日本道路公団で実施された大口徑杭による杭頭載荷実験より得られた結果を基にシステムの解析精度の検討も行った。

2. 解析システム(GPILE)

本解析システムは、サブストラクチャ法に基づいた離散化手法を適用して、そのフレキシビリティを評価している。杭は分布質量系あるいは離散質量系として、それぞれ伝達マトリックス法、有限要素法から定式化している。地盤一杭の連成系の支配方程式は、地盤反力を未知数に採るフレキシビリティ法と杭の変位を未知数に採るスティフネス法に分かれている。ここで以下に今回適用した各解析手法の定式化を示す。

(1) スティフネス法(3D) サブストラクチャ化された地盤一杭において、まず地盤について述べる。地盤を軸対称の層状地盤とモデル化する。地中加振外力としてフーリエモード($n=0, 1$)に対応したリング加振を考え、杭と地盤のインターフェイス上の離散節点における変位解を求めることによって地盤のフレキシビリティの評価を行った。変位解は解析を容易にするため深さ方向に有限要素法を取り入れ離散化することで準解析解を求めている。これより地盤(下添字 S)フレキシビリティを定義し、次式を得る。

$$U_s = F_s f_p \quad (1)$$

ここで U_s , f_p は境界における地盤の変位、地盤が杭から受ける杭反力を示している。

杭は構造要素としての梁で表し、動的剛性マトリックスを導入すれば、離散化された杭の支配方程式は、

$$\begin{bmatrix} D_{hh} & D_{hi} \\ D_{ih} & D_{ii} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_p^h \\ U_i^h \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_{so}^h \\ P_{si}^h \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} P_s^h \\ P_i^h \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} P_e^h \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 $\{P_s^h \ P_i^h\}^T$ は相互作用における地盤反力、 $\{P_e^h \ 0\}^T$ は頂版からの作用力、 $\{P_{so}^h \ P_{si}^h\}^T$ は有効入力である。また上添字 h, i は杭頭節点、それ以外の杭節点を示す。杭と地盤の連成振動を変位の適合と力のつり合い条件から導くと、

$$\hat{D}_{hh} U_p^h = P_e^h + \hat{P}_s^h \quad (3)$$

ただし、 $\hat{D}_{hh} = D_{hh} - D_{hi} [D_{ii} + F_i^{-1}] D_{ih}$ $\hat{P}_s^h = P_s^h - D_{hi} [D_{ii} + F_i^{-1}] P_{so}^h$ であり、 $\hat{D}_{hh}$ は杭頭インピーダンスを、 $\hat{P}_s^h$ は同有効入力を定義している。よって、群杭総体としてのインピーダンスと有効入力がそれぞれ、

$$K_p^G = \beta^T \hat{D}_{hh} \beta \quad P_p^G = \beta^T \hat{P}_s^h \quad (4)$$

と定義される。

(2) フレキシビリティ法(リング杭) 杭はスティフネス法と同じく梁で表し、群杭をリング杭と仮定して、そのフレキシビリティ F_p の評価を行う。その場合、梁の横振動と縦振動の方程式を独立に解く。杭が層状地盤中に打設されている場合は各層毎に自由振動解を求め、層の境界面において伝達マトリックス法を適用している。地盤との相互作用における杭の応答を、線形重ね合わせの法則から、地盤との相互作用力によるものと杭頭に強制変位 U_p^h を与えたときのものに分けて考える。

$$U_p = U_p^b + U_p^h \quad (5)$$

ここに、 U_p^b は杭頭拘束の状態での梁のフレキシビリティ α と杭頭と頂版中央とを結ぶ剛体結合マトリックス β を介して、

$$U_p^b = \alpha \beta U_p^o \quad (6)$$

と表せる。

リング杭と地盤との連成振動に関する支配方程式は、

$$[F_p + F_s] f_s^b = \alpha \beta U_p^o \quad (7)$$

ここで、杭の配置は離散的であり、一方、地盤は連続体であるので、リング上の一週における仮想仕事を等値する規範を採用している。式(7)を未知作用力 f_s^b について解くと、杭に作用する地盤反力が得られる。ここで杭の任意断面での地盤反力 f_s^b を杭頭での断面力 f_p^b へ変換し、さらに杭頭での断面力を杭頂版重心への合力に変換して表す。また杭頭変位による杭頭断面力 f_p^b も同様に表すと、リング杭の仮定から、

$$f_p^{G1} = \int_0^{2\pi} \beta^T \alpha^T f_p^b R d\theta \quad f_p^{G2} = \int_0^{2\pi} \beta^T f_p^b R d\theta \quad (8)$$

したがって、杭頂版重心へ縮合した力

$$P_p^o = f_p^{G1} + f_p^{G2} = K_p^o U_p^o \quad (9)$$

よってインピーダンス関数 K_p^o が定義できる。

(3) スティフネス法 (A3D) 地盤の有限要素モデルについて定式化を行う。今、動的剛性マトリックス $\hat{D}$ を定義すれば、地盤の離散系としての運動方程式は、

$$\begin{bmatrix} \hat{D}_{ff} & \hat{D}_{fsp} & \hat{D}_{fg} \\ \hat{D}_{spf} & \hat{D}_{spsp} & \hat{D}_{spg} \\ \hat{D}_{gf} & \hat{D}_{gsp} & \hat{D}_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_f \\ U_{sp} \\ U_g \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_f \\ P_{sp} \\ P_g \end{Bmatrix} \quad (10)$$

ここで添字 f は頂版との共有節点、 p は杭節点、 s は地盤節点、 g は基盤節点である。式(10)の自由度を基礎との共有節点のみに縮合すると、

$$X_f U_f = P_f - P_f^o \quad (11)$$

ここで、 X_f は地盤と杭の頂版との共有節点において評価されるインピーダンス、 P_f^o は、それらの節点への有効入力であり、

$$X_f = \hat{D}_{ff} - \hat{D}_{fsp} \hat{D}_{fg}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{D}_{spsp} & \hat{D}_{spg} \\ \hat{D}_{gsp} & \hat{D}_{gg} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \hat{D}_{spf} \\ \hat{D}_{gf} \end{Bmatrix} \quad P_f^o = \hat{D}_{fsp} \hat{D}_{fg}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{D}_{spsp} & \hat{D}_{spg} \\ \hat{D}_{gsp} & \hat{D}_{gg} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} 0 \\ P_g \end{Bmatrix} \quad (12)$$

杭の方程式は、

$$\begin{bmatrix} D_{ff} & D_{fg} \\ D_{gf} & D_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_f \\ U_g \end{Bmatrix}_p = \begin{Bmatrix} P_f \\ P_g \end{Bmatrix} \quad (13)$$

式(11)を共有節点について縮合し、地盤と杭の連成解析を変位の適合、力のつり合い条件から行えば、先に求めた地盤のインピーダンス X_f を導入して、

$$X_f U_f = P_f + P_f^o \quad (14)$$

よって、

$$\begin{bmatrix} D_h & D_{hl} \\ D_{lh} & D_{ll} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_h^p \\ U_l^p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_h \\ P_l \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} P_e \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (15)$$

上式を杭頭節点に縮合し、頂版重心でのインピーダンスを評価すると、

$$\hat{X}_f \hat{U}_f = \hat{P}_f + \hat{P}_f^o \quad (16)$$

ただし、

$$\hat{X}_f = \beta^T [D_{hh} - D_{hl}^{-1} D_{lh}] \quad \hat{P}_f^o = \beta^T [P_h + D_{hl} D_{ll}^{-1} P_l] \quad \hat{P}_f = \beta^T P_e \quad (17)$$

3. 解析結果とその考察

図1に示す四本杭を有する杭基礎構造物の各手法による杭頭インピーダンスを図2に示す。3手法とも低振動数領域ではよい一致を見せているが、高振動数領域で、リング杭仮定によるフレキシビリティ法が実部、虚部においてやや過敏に変化している。これは、群杭の挙動を完全なリング杭としての挙動に置き換えているため、高振動数時の両者の差が評価されたものと考えられる。

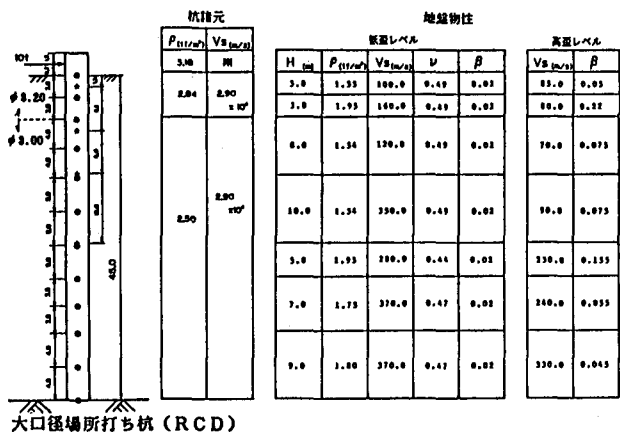


表2 杭及び地盤諸元 (単杭)

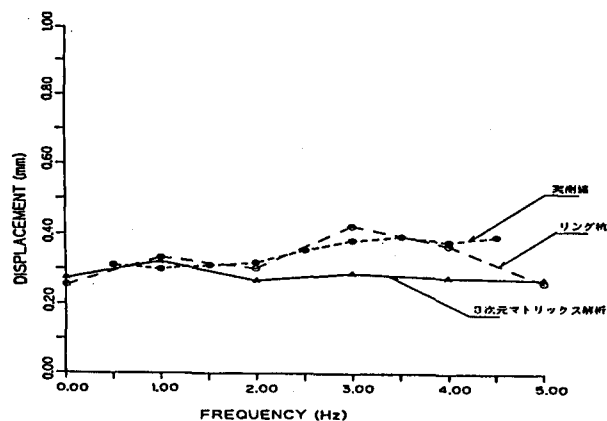


図3 杭頭水平変位

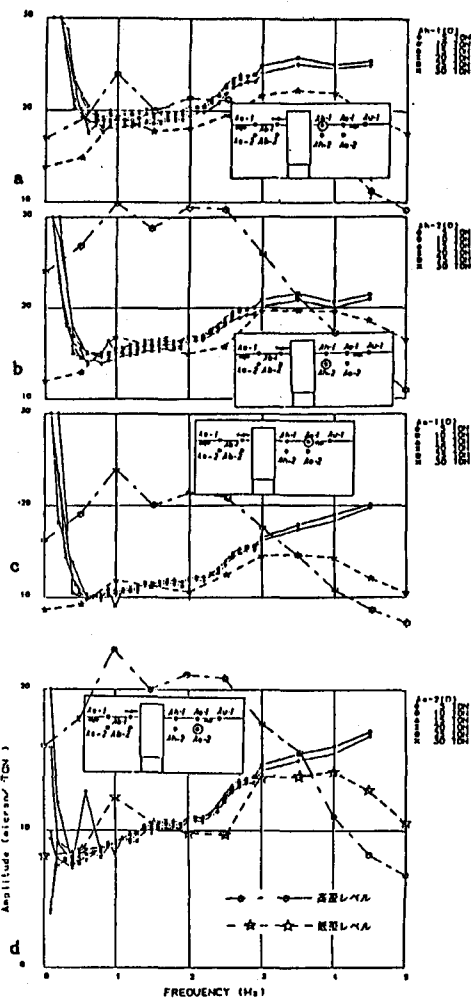


図4 近傍地盤の応答共振曲線

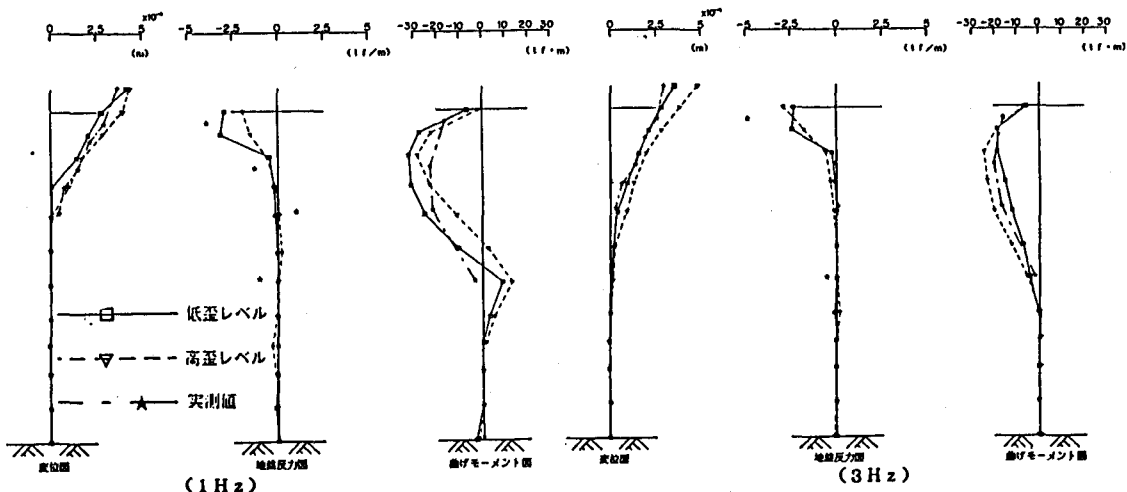


図5 杭変形及び断面力、地盤反力分布