

I - 659

杭打設時の周辺地盤応答評価について

岡山大学大学院 学生員 矢木誠一郎
岡山大学工学部 正会員 竹宮宏和

1 まえがき

杭基礎は軟弱な地盤上の構造物の基礎形式として通常使用される。杭打設時の振動は軟弱地盤を伝播し、軟弱地盤の振動を誘発させる。そして周辺構造物への振動障害を起こさせる場合も多い。本研究では、杭打設時の周辺地盤応答に注目した場合の載荷力、加振振動数を制御するための建設支援システムの開発を目指したものであり、衝撃載荷下、及び調和加振状態に対する3次元解析による地盤内の波動伝播現象と応答評価に注目している。

2 解析法

円筒座標系による3次元の弾性体波動解析は、周方向にFourier級数展開、半径方向にHankel(H)変換を行うと波数領域における支配方程式が導かれる。

$$\hat{u}(k, z) = \alpha_n \int_0^\infty r C_n(kr) \int_0^{2\pi} T_n(\theta) u(r, \theta, z) d\theta dr \quad (1) \quad u(r, \theta, z) = \sum_{n=0}^\infty T_n(\theta) \int_0^\infty r C_n(kr) \hat{u}(k, z) dk \quad (2)$$

$$C_n(kr) = \begin{bmatrix} \frac{1}{k} J_n(kr), r & \frac{n}{kr} J_n(kr) & 0 \\ \frac{n}{kr} J_n(kr) & \frac{1}{k} J_n(kr), r & 0 \\ 0 & 0 & -J_n(kr) \end{bmatrix} \quad \alpha_n = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} & n=0 \\ \frac{1}{\pi} & n \neq 0 \end{cases}$$

軸対称の場合 $T_n^s(\theta) = \text{diag}(\cos n\theta, -\sin n\theta, \cos n\theta)$

逆軸対称の場合 $T_n^a(\theta) = \text{diag}(\sin n\theta, \cos n\theta, \sin n\theta)$

衝撃載荷による応答はLamb問題としての解析的手法を採用する。時間依存関数 $T(t)$ をもつディスク力に対する弾性体の応答解析法は、時間に関してLaplace(L)変換を施してL-H領域解を求める。近似手法として、Heaviside ($H(t)$) のステップ関数載荷解を利用する。つまり時間(T)-空間(S)領域、L-H領域に対する地表面鉛直ディスク載荷力は

$$\text{T-S領域} \quad t_z(r, \theta, t) = \frac{T(t)}{\pi a^2} \quad (3) \quad \text{L-H領域} \quad \hat{t}_z(k, p) = \frac{J_1(ka)}{\pi ka} T(p) \quad (4)$$

ここで $T(t)$ と $T(p)$ は、 $T(t) = H(t) \Leftrightarrow T(p) = 1/p$ のように対応する。

表面ディスク衝撃力の境界条件を満たすHelmholtz解は面内波と面外波について求められ、逆L-H変換を行う。まず逆L変換を行い、T-H領域解を得る。例えば鉛直変位は、

$$\hat{U}_{zz}(\xi, z, t) = \frac{C \{ (1+d^2)e^{-kcz} - 2e^{-k\alpha z} \}}{2\mu K(C_R)} T(t) - \frac{8}{\pi\mu} \int_0^\infty \frac{\bar{a}^2 b \{ (1-b^2)e^{-\bar{a}z} - 2\cos kbz \}}{(1-b^2)^4 + 16\bar{a}^2 b^2} T(t) d\eta$$

$$- \frac{4}{\pi\mu} \int_0^\infty \frac{\bar{a} (1-b^2)^2 \sin kbz}{(1-b^2)^4 + 16\bar{a}^2 b^2} T(t) d\eta + \frac{2}{\pi\mu} \int_0^\infty \frac{a \{ (b^2-1)\cos \bar{a}z + 2\cos kbz \}}{(1-b^2)^2 + 4ab} T(t) d\eta \quad (5)$$

但し、 $\bar{a} = \sqrt{1-\eta^2/\alpha^2}z$, $a = \sqrt{\eta^2/\alpha^2 - 1}z$, $b = \sqrt{\eta^2/\beta^2 - 1}z$, $c = \sqrt{1-C_R^2/\alpha^2}z$, $d = \sqrt{1-C_R^2/\beta^2}z$

α : P波速度, β : S波速度, C_R : Raileigh波速度

さらに式(2)の波数積分は解析的になされ、T-S領域解が得られる。

調和加振状態では時間項として $e^{i\omega t}$ を仮定する。応答解析には地盤を層状に離散化する薄層要素法を用いる。同手法は各層内においては変位は線形変化すると仮定して各層ごとの剛性マトリックスを仮想変位の原理より導き、各層の節点の変位と応力の境界条件より全体系での剛性マトリックスを定義し波数領域における支配方程式を得る。

波数に関する固有モード分解を行い波数領域解

$$\text{面内について} \quad \begin{Bmatrix} \hat{u}_x \\ i\hat{u}_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_x D_R \Phi_x^T & k\Phi_x K_R^{-1} D_R \Phi_x^T \\ k\Phi_z D_R K_R^{-1} \Phi_x^T & \Phi_z D_R \Phi_z^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{p}_x \\ i\hat{p}_z \end{Bmatrix} \quad (6) \quad \text{面外について} \quad \hat{u}_y = \Phi_y D_L \Phi_y^T \hat{p}_y \quad (7)$$

但し、 Φ : 固有ベクトル, K : 固有値からなる対角マトリックス, $D = (k^2 I - K^2)^{-1}$

を求め式(2)の波数積分は留数積分を遂行することにより空間領域解を得る。

3 数値解析例と考察

モデル化: 杭打設作業過程をモデル化して、各杭の打ち込み深さでの衝撃載荷、調和加振による周辺の地表面応答を評価する。杭打設時の載荷および加振状態は、杭の先端ではディスク載荷（加振）、周辺部ではリング載荷

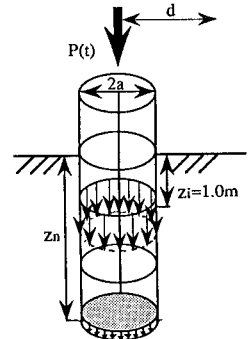


図1 杭打ち時の地盤への応力載荷状態

表1 地盤物性

ヤング係数 E [kN/m^2]	2.5×10^5
密度 ρ [t/m^3]	2.0
ポアソン比 ν	0.25
P波速度 [m/sec]	387.3
S波速度 [m/sec]	223.6

（加振）であるが、杭半径より応答点の距離がある程度離れると等価なディスク載荷（加振）とみなせるので、離散的（1mごと）にディスク載荷（加振）を与える（図1参照）。このとき杭先端部と周辺部の載荷（加振）強度の比は10:1と仮定した。またトータルの載荷（加振）強度は一定で1.0(kN)、および杭半径は0.5(m)とした。

$$P = \alpha_n q(z_n) + \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i q(z_i) \quad \alpha_n : \alpha_i = 10 : 1 \quad (i \neq n) \quad (8)$$

また、内部載荷（加振）による地表面応答の計算では相反作用の定理を適用した。

結果と考察：まず、本論文での解析精度の検証のため、衝撃載荷解を利用して加振振動数 $f=10(\text{Hz})$ のときの調和力載荷の定常状態と薄層要素法による調和加振解を図2.a, 図2.bにおいて比較した。同図は地表面の最大変位を示しており、各打ち込み段階に対して両解は良く一致していることが判る。

図2.a, 図2.bからは距離減衰を評価することができ、杭の各打ち込み段階で距離減衰の様相は異なる。式(8)の仮定の下では、地表面近傍で距離減衰は大きく、深い地中打ち込み段階では距離減衰は比較的小さい。このことを波動論的に説明するために、地表面と地中においてそれぞれ加振したときの地表面の複素応答を図3.a, 図3.bに示した。他の解析からも実証されていることだが、地表面加振では表面波となるRayleigh波の励起が大きく、対象地盤、振動数ではその波長は $\lambda_R = 20.6(\text{m})$ で、それが地表面に沿って伝播していることが明瞭に捉えられている。地中加振では、実体波の占める割合が大きくなる。そのため、地表面ほどRayleigh波の伝播は顕著でない。

図4は調和加振時の各距離における地盤内の応答の最大変位を深さ方向に調べたもので、杭位置からの距離に従って地表面近傍の応答が急速に減衰する様子が明らかである。式(8)の下では、最大変位は地表面より少し地中に入った打ち込み段階であった。

図5は杭の衝撃載荷におけるの遷移応答を描いたものである。杭の各打ち込み段階での周辺地盤への波動伝播過程が明瞭である。

4 結論

杭打ち時の各深さに対する周辺地盤への距離減衰、そして各距離における地盤内の最大応答変位が明確にされた。

参考文献

日下部・竹宮：点/円盤表面衝撃載荷による半無限体の遷移応答
（土木学会第48回年次学術講演概要集 第1部 pp.506-507, 1993）

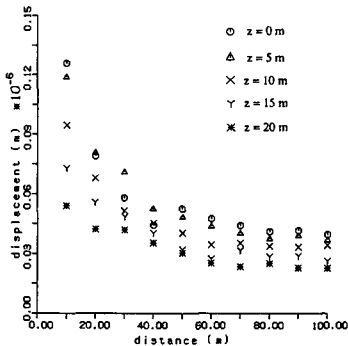


図2.a 杭の各打ち込み深さにおける地表面応答鉛直最大変位分布（時間領域解）

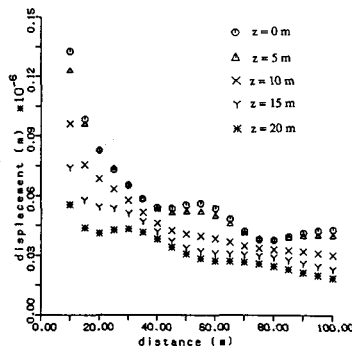


図2.b 杭の各打ち込み深さにおける地表面応答鉛直最大変位分布（振動数領域解）

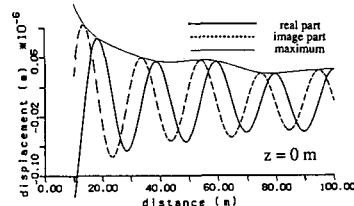


図3.a 地表面調和加振時の地表面応答の複素変位分布（鉛直成分）

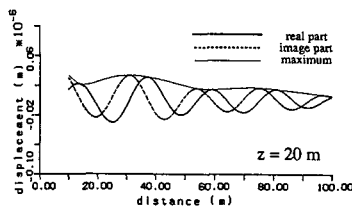


図3.b 内部調和加振時の地表面応答の複素変位分布（鉛直成分）

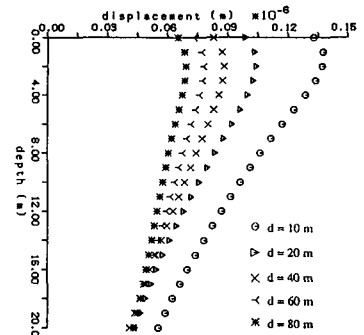


図4 杭の各打ち込み深さにおける深さ方向応答、最大変位分布（鉛直変位）

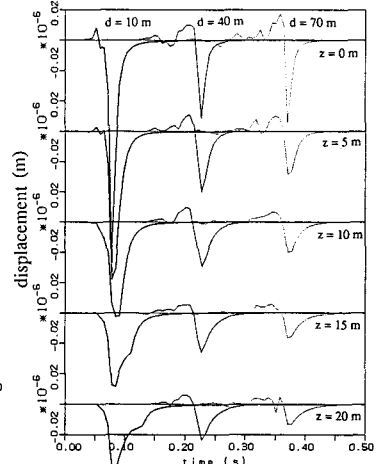


図5 杭の衝撃載荷による遷移応答（鉛直成分）