

防振杭の有限要素表面波透過解析

新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 山谷 啓晃
 新潟大学工学部建設学科 正会員 阿部 和久
 新潟大学大学院自然科学研究科 正会員 紅露 一寛

1. はじめに

防振杭は地盤振動の低減を目的として地盤中に設置されるが、それを周期的に配置することでストップバンドと呼ばれる波動が伝播しない周波数帯を持ち得るものと考えられる。そのため、当研究室では、二次元的に配置された周期杭を対象とした表面波モードのバンド解析を試みた。文献¹⁾では杭の剛性や配置パターンの違いによるバンド特性の評価を行ったが、これは無限長杭を対象としており、その点が現実的ではなかった。そのため、文献²⁾では有限長杭を対象とした評価を試みた。

なお、文献¹⁾および文献²⁾では、 (x, y) 面内に防振杭が無限に配置された二重周期場を対象としている。しかし、現実には、杭が一方方向にのみ周期的に配置される杭列を採用するものが一般的と考えられる。

なお、同様の問題として、無限長周期連続橋・地盤連成系の実体波入射に対する波動応答解析法が文献³⁾に検討されている。しかし、表面波に対する応答は検討されていない。そこで本研究では、文献³⁾と同様の手法を、周期的に配置された防振杭列に適用し、Rayleigh 波入射に対する透過解析を行い、その防振効果の評価を試みる。なお、既往の研究¹⁾²⁾では、バンド構造に関する定性的評価に留まっていたが、本手法では杭列の波動透過特性に関して定量的評価を行うことができる。

2. 対象とする問題

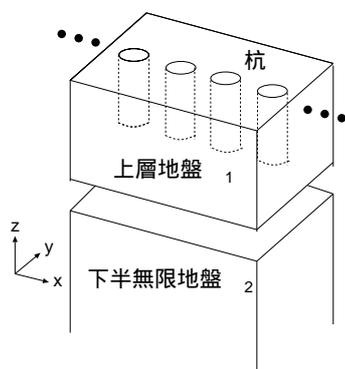


図1 対象とする杭・地盤連成系

図1のような半無限地盤中に杭を配置した無限周期構造を対象とする。地盤は等方均質な弾性体で与え、下部 Ω_2 は一様半無限場で与えられているものとする。入力する Rayleigh

波の水平変位成分と鉛直変位成分を、伝播方向座標軸 ξ に関連して、それぞれ以下の式で与える。

$$\begin{aligned} u_1 &= ke^{-ik\xi}(-iAe^{k\nu_1 z} + \nu_2 B e^{k\nu_2 z}) \\ u_2 &= ke^{-ik\xi}(-\nu_1 A e^{k\nu_1 z} + iB e^{k\nu_2 z}) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 u_1 は進行方向変位、 u_2 は鉛直方向 (z 方向) 変位、 k は波数、 ν_1, ν_2 は振幅の鉛直方向減衰に関する係数、 A および B は振幅である。

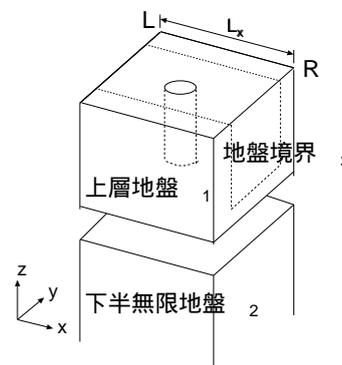


図2 解析対象領域

また、Floquet 原理を用いることによって、図2に示す様に周期構造の両端の変位 u と力 F に対して次の周期条件が成り立ち、無限周期構造を最小構造単位であるユニットセル内の問題に帰着して扱うことができる。

$$\begin{aligned} u(x + L_x, \kappa_x) &= e^{-i\kappa_x L_x} u(x, \kappa_x) \\ F(x + L_x, \kappa_x) &= -e^{-i\kappa_x L_x} F(x, \kappa_x) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 x は防振杭が周期的に配置される方向である。また、 L_x はユニットセルの周期長であり、 κ_x は入射波動の x 方向波数成分である。

3. 解の構成

図2に示す様に、杭を内部に含む地盤境界 Γ_3 内における運動方程式は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} \hat{K}_{LL} & \hat{K}_{LR} & \hat{K}_{LM} & \hat{K}_{L3} \\ \hat{K}_{RL} & \hat{K}_{RR} & \hat{K}_{RM} & \hat{K}_{R3} \\ \hat{K}_{ML} & \hat{K}_{MR} & \hat{K}_{MM} & \hat{K}_{M3} \\ \hat{K}_{3L} & \hat{K}_{3R} & \hat{K}_{3M} & \hat{K}_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_L \\ u_R \\ u_M \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_L \\ F_R \\ F_M \\ F_3 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 $\hat{K}_{ij} = K_{ij} - \omega^2 M_{ij}$ で、 K_{ij} は剛性行列、 M_{ij} は質量行列、 ω は円振動数である。また、 $()_L$ および $()_R$ は 1

ユニットの左端,右端の境界上の節点, $(\cdot)_3$ は地盤境界 Γ_3 上の節点, $(\cdot)_M$ はそれ以外のユニットセル内の節点に関する部分ベクトルおよび行列である.

式 (3) に対して, Floquet 原理の周期条件による行列の縮約を適用し, Γ_3 上における変位と節点力の関係を与えるインピーダンス行列 $\hat{K}_3^{(3)}$ を導入すると, 次の求解方程式を得る.

$$\begin{bmatrix} \hat{K}'_{LL} & \hat{K}'_{LM} & \hat{K}'_{L3} \\ \hat{K}'_{ML} & \hat{K}'_{MM} & \hat{K}'_{M3} \\ \hat{K}'_{3L} & \hat{K}'_{3M} & \hat{K}'_{33} + \tilde{K}_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_L \\ u_M \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -F^R + \tilde{K}_3 u^R \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ここで, u^R, F^R は Rayleigh 波の節点変位と節点力, \hat{K}'_{ij} は Floquet 原理の周期条件によって \hat{K}_{ij} を縮約して得られる行列である.

4. 解析条件

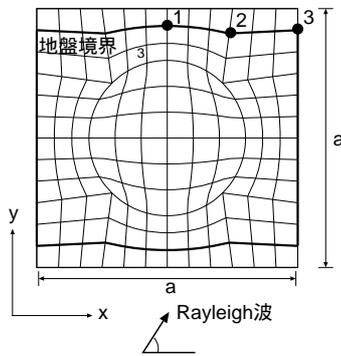


図3 ユニットセル上面の要素分割

図1に示した様に, 円形中実断面のコンクリート杭を一行に配置した場合を想定する. この時のユニットセル上面を, 図3のように離散化した. なお, 20 節点, 二次要素を用いた. 地盤とコンクリート杭のポアソン比は, それぞれ 0.4 および 0.2 とし, 地盤に対するコンクリート杭のせん断剛性比と密度比をそれぞれ 10 と 1.5 に設定した. Rayleigh 波の入射角は波動の伝播方向を y 軸方向にとり, x 軸とのなす角度 θ を 90 度と設定した場合を以下に示す. 図に示した領域の x, y 軸方向の一辺の長さを a とし, Ω_1 の z 軸方向の一辺の長さを $2.0a$ とした. また, 杭の半径を $0.3a$ とした. なお, 文献²⁾での検討結果より, 杭長を杭間隔の 2 倍程度に設定することで無限長杭と同等の振動遮蔽効果が期待できるという結論が得られているため, 杭の長さを $1.8a$ と設定した. z 軸方向には 10 分割し, 6981 節点, 1440 要素で Ω_1 を離散化した.

5. 解析結果

横波伝播速度 C_T とユニットセルの一辺の長さ a により無次元化した周波数 $\bar{\omega} = \omega a / C_T$ を 1 から 5 まで変化させ応答解析を行った. その結果を図4に示す. 図には図3に示した代表節点 1, 2, 3 における y 軸方向変位振幅の入射 Rayleigh 波に対する増幅率と周波数との関係を示した. なお, 変位振

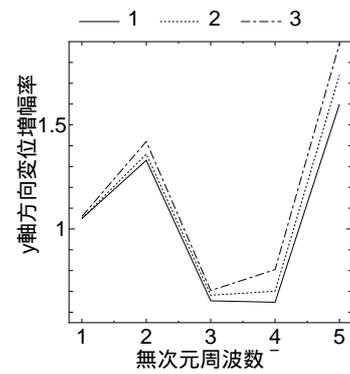


図4 y 軸方向変位増幅率

幅の増幅率は, 杭-地盤系における波動応答と, 杭を考慮していない一様地盤における Rayleigh 波の変位振幅データとの比によって次式により定義した.

$$\text{増幅率} = \frac{\text{杭 - 地盤系の変位応答振幅}}{\text{Rayleigh 波の変位振幅}} \quad (5)$$

図4に示すように, $\bar{\omega} \leq 2$ の比較的低い周波数帯においては変位振幅増幅率はほぼ等倍かそれ以上となっているが, $\bar{\omega} = 3 \sim 4$ 付近の周波数域で変位振幅が低減されているのが分かる. なお, 当該周波数は, 杭間隔が波長の $1/2$ に概ね相当する場合に対応しているが, 文献²⁾においても $\bar{\omega} = 3 \sim 4$ の周波数域において無限周期配置でのストップバンドの存在が確認されており, 本研究の解析結果と符号している. ただし, 本解析では, 既往の研究⁴⁾同様, 周期杭を 1 層配置したケースのみ検討対象とした. 周期場のバンド特性を活用するためには 3 層程度の配置が必要と考えられ⁵⁾, 今後は層数の振動低減に対する効果についても検討することが望まれる.

6. おわりに

一方向に配置された無限周期杭列の波動透過解析法を有限要素法に基づき構成した. 地盤は 3 次元半無限弾性場としてモデル化し, その中に有限長杭を等間隔に配置した. Floquet 原理と Floquet 変換を併用して, 杭 1 本を内部に含む有限領域における運動方程式に帰着して当該問題を解いた. 解析例として, 地盤中にコンクリート杭が一行に配置された場合を対象に, Rayleigh 波入射に対する応答解析を行った. その結果, 入射波長の $1/2$ が杭間隔に概ね一致する場合に, 透過波の低減効果が認められた.

参考文献

- 1) 阿部和久, 荒木聡秀, 紅露一寛: 二重周期弾性場の有限要素表面波分散解析, 土木学会論文集 A2, 67(2), L905-L913, 2011.
- 2) 古里駿, 阿部和久, 紅露一寛: 有限長周期杭が配置された地盤の表面波分散解析, 土木学会論文集 A2, 69(2), L799-L807, 2013.
- 3) 阿部和久: 周期構造物・地盤連成系の 3 次元波動応答解析手法, 計算数理工学レビュー, No.2013-2, 29-44, 2013.
- 4) Avilés, J. and Sánchez-Sesma, F.J.: Piles as barrier for elastic waves, J. Geotech. Eng., ASCE, 109, 1133-1146, 1983.
- 5) 阿部和久, 中山悠, 紅露一寛: 中間層を有する周期複合材の弾性波動解析, 応用力学論文集, 13, 1041-1048, 2010.