

(111) 根入れを有する構造物基礎と地盤との動的相互作用の簡便な評価手法

○ 東京大学生産技術研究所 正会員 三神 厚
東京大学生産技術研究所 正会員 小長井 一男

1. はじめに

根入れを有する基礎構造物と地盤との動的相互作用を評価するにあたっては、基礎構造物近傍の地盤構成のみならず三次元的な広がりを持つ複雑な地形・地質条件をも考慮する必要がある。このような数値解析にあたっては三次元有限要素法をはじめ、多くの高度な手法が提案されているが、これらの手法において地盤の不整形性を考慮した基礎と地盤の動的相互作用を行なうためには多大な労力と計算機容量を必要とする。そこでこれらの諸要因を簡便な方法で評価しかつ所要の精度を有するような合理的な数値モデルの確立が要求される。本研究ではこれまで田村等によって開発された不整形表層地盤の地震応答解析のための簡便化数値モデル（擬似三次元地盤モデル）⁽¹⁾を基礎と地盤との動的相互作用評価手法として適用してきた。このモデルでは表層地盤の深さ方向の振動モードに対してある特定の振動モードを仮定する必要がある、これまで表層地盤全体に対して一様な振動モードを仮定してきた。しかし基礎のごく近傍地盤と遠方地盤とは当然のことながら異なる振動をすることや、表層地盤が不整形性を有する場合には表層の共振振動数よりも高い振動数領域において地盤境界からの波動の反射の影響を受けることから、場所ごとに異なった振動モードを仮定し剛体基礎による地盤拘束の影響や不整形地盤の振動特性を考慮する必要がある。

本論文では一様な厚さを有する表層地盤中に埋めこまれた剛体円筒基礎がロッキング振動するときの表層地盤振動モードの変化を田治見の方法⁽²⁾から求め、その振動モードの場所ごとの変化を簡便な方法によって擬似三次元モデルに反映させモデルの改良を試みるとともに、今後このモデルに不整形地盤の影響等を簡便な方法で考慮する可能性を示した。ただしここでの検討は剛基盤上に載る一様厚さの軟弱表層地盤中に円筒剛体基礎がその底面を剛基盤に置いて埋めこまれている場合の基礎側方地盤のモデル化に限定し、基盤方向への波動の逸散については考慮しない。

2. 簡便化の手順および本解析手法

地盤の上下動が水平動に比べて小さいものとして無視するという仮定は、解析を容易にするものとしてよく用いられてきた。さらにモデルを簡便にするために、深さ方向に対してある特定の振動モードを仮定したものが擬似三次元モデルである。

2.1 田治見の方法

円筒座標系 (r, θ, z) において上下動成分を削除した弾性体の支配方程式は以下のように与えられる。

$$(\lambda + 2\mu) \frac{\partial(\Delta e^{i\omega t})}{\partial r} - \frac{2\mu}{r} \frac{\partial(\Omega_z e^{i\omega t})}{\partial \theta} = \rho \frac{\partial^2(u_r e^{i\omega t})}{\partial t^2} - \mu \frac{\partial^2(u_r e^{i\omega t})}{\partial z^2} - \mu' \frac{\partial^3}{\partial t \partial z^2}(u_r e^{i\omega t}) \quad (1)$$

$$(\lambda + 2\mu) \frac{1}{r} \frac{\partial(\Delta e^{i\omega t})}{\partial \theta} + 2\mu \frac{\partial(\Omega_z e^{i\omega t})}{\partial r} = \rho \frac{\partial^2(u_\theta e^{i\omega t})}{\partial t^2} - \mu \frac{\partial^2(u_\theta e^{i\omega t})}{\partial z^2} - \mu' \frac{\partial^3}{\partial t \partial z^2}(u_\theta e^{i\omega t}) \quad (2)$$

ここに、 λ, μ はLaméの定数、 ρ は弾性体の密度、 μ は粘性定数、 (u_r, u_θ, u_z) は (r, θ, z) 方向変位

$$\Delta = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \quad (3)$$

$$\Omega_z = \frac{1}{2r} \left(\frac{\partial}{\partial r} (ru_\theta) - \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right) \quad (4)$$

これらの方程式の特解は、 r, θ, z それぞれの変数分離形で表現することが可能で、深さ方向(z)の振動形は、これらの特解を用いて与えられる。

田治見は上下動無視の仮定のもと、地盤の深さ方向の地盤振動モードを三角級数で表現し、剛体基礎との境界条件を満たすように未定係数を決定することによって式(1)、(2)を解き、円筒剛体基礎のロッキングに対する地盤の動的剛性評価を厳密に行った。

剛体基礎加振方向およびその直角方向の地盤振動モードを、基礎半径(a)の1～5倍までの範囲に着目しそれぞれ図2、3に示す。剛体基礎近傍地盤は基礎からの拘束の影響を強く受け基礎に頂点を置く逆三角形型の振動モードで変形するが、剛体基礎から

離れるにしたがって表層地盤の1次のせん断振動モード (sin 波 $\frac{1}{4}$ 波長状) に近づき、加振直角方向では $r/a=3.0$ でおおむね Sin モードに一致している。以下では、図2、3に示される地盤の振動モードの変化を擬似三次元モデルに簡便な方法によって反映させるを試みる。

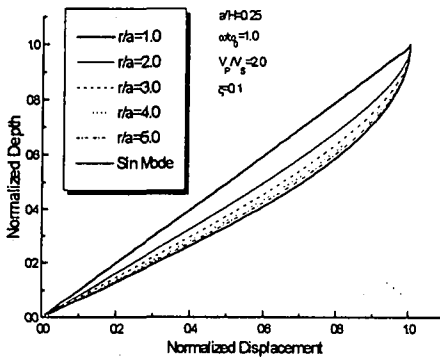
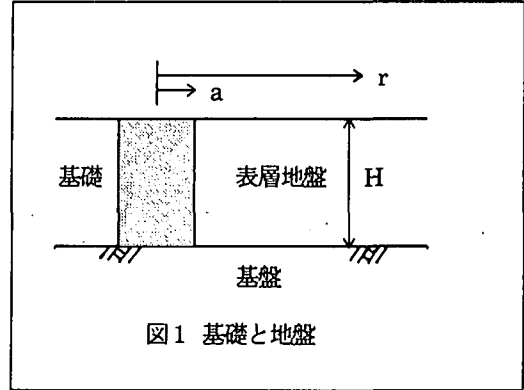


図2 加振方向の地盤振動形

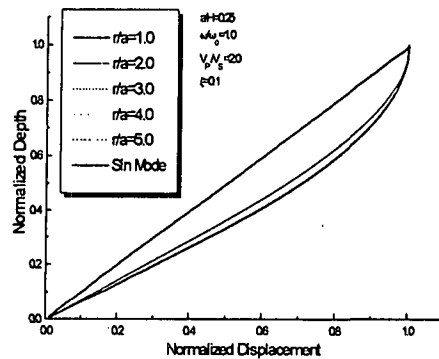


図3 加振直角方向の地盤振動形

2.2 擬似三次元モデルによる解析

基礎上に載る表層地盤をモデル化するにあたって、表層地盤をいくつかの土柱に分割し、それぞれの土柱に対して特定の振動モードを仮定すると、いくつかの一自由度の振動子に置き換えることができ、これらを二次元の有限要素網で連結して表層地盤全体のモデルとしている(図4)。これまでの本研究では地盤の振動モードが場所によらず表層地盤全体で一様であることを仮定してきた。しかし基礎から離れると基礎からの拘束の影響が弱まるため基礎近傍とは異なるモードで振動することや、地盤が不整形性を有する場合には高次振動モードの影響が強くなることが考えられることから、地盤の振動モードを場所ごとに変

化させ簡便化モデルの改良とその適用範囲の拡大を図ることが望まれる。

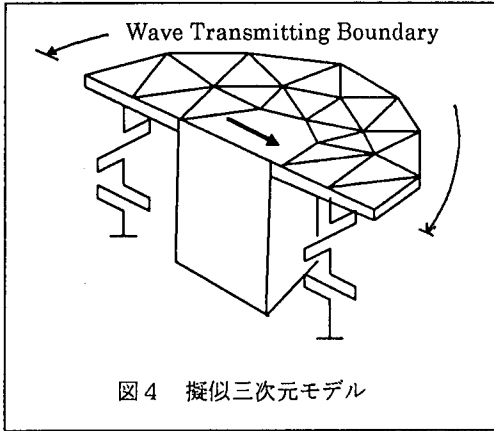


図4 擬似三次元モデル

図2、3に示す場所ごとの振動形の変化を簡便な方法で考慮するために、(5)式のように逆三角形振動モードとせん断一次振動モードを線形結合したモードを用いて表層地盤の振動モードの変化を考慮する。

すなわち、 $C=0$ は三角形モードを示し C が大きくなるにつれて振動モードが変化し、 $C=1$ でせん断一次モードに一致することから、係数 C は Sin モードの近似振動モードに対する寄与率を表す係数で、式(6)に示すようないくつかのパラメータの関数になっている。これまでの検討から表層地盤の固有振動数の数倍までの範囲では、加振方向、加振直角方向ともに基礎半径、表層深さおよび基礎から着目点までの距離を組み合わせ

せた変数 $\frac{r-a}{H}$ に主に依存することがわかった。

$$\psi = (1 - C) \frac{z}{H} + C \sin\left(\frac{\pi z}{2H}\right) \quad (5)$$

$$C = C\left(\frac{a}{H}, \frac{r}{H}, \frac{\omega}{\omega_0}, \frac{V_P}{V_S} \xi, \theta\right) \quad (6)$$

ただし、 a :基礎半径、 H :表層厚、 ω, ω_0 :表層地盤の振動数および共振振動数
 V_P, V_S :P波およびS波速度、 ξ :減衰定数、 θ :加振方向から着目点までの角度

図5、6は、基礎加振振動数と表層地盤の固有振動数の比が1から5までのそれぞれについて、 C と $\frac{r-a}{H}$ の関係を示したものである。解析にあたっては、式(5)により示される近似振動形と田治見の方法から求められる振動形の誤差の二乗和を最小にする係数 C を加振方向、加振直角方向それぞれについて決定し、それらを変数 $\frac{r-a}{H}$ の7次多項式により近似表現した後、 θ に応じてそれらを組み合わせた。

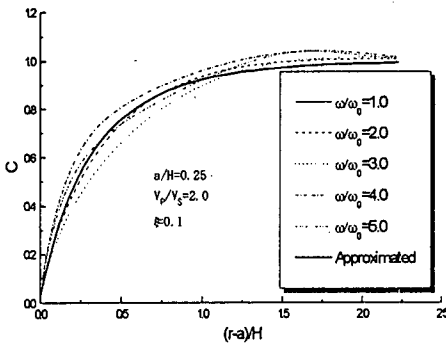


図5 加振方向における係数 C の変化

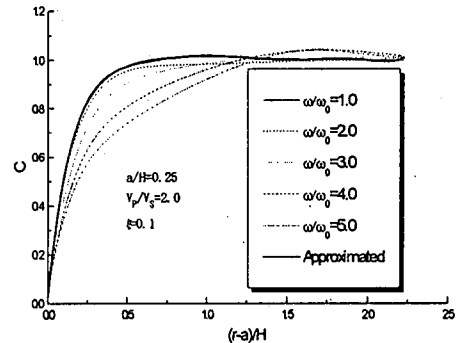


図6 加振直角方向における係数 C の変化

3. 解析結果

図7は円筒剛体基礎のロッキングに対する地盤の複素剛性を周波数領域で表現したもので、それぞれ擬似三次元モデルによる解析で地盤の深さ方向に対して三角形振動モード、せん断一次モード、それらを組み合わせたモードを仮定した場合の地盤の複素剛性および田治見の方法による解が示されている。三角形とせん断一次モードを結合した場合の解は三角形あるいはせん断一次のみを地盤に仮定した場合の中間に存在するが、田治見の方法による解と比較すると、特に実部において開きがあり、実部、虚部ともにむしろ三角形のみの振動モードを表層地盤全体に仮定したほうが、田治見の厳密なアプローチによる解に近い結果があらわれた。

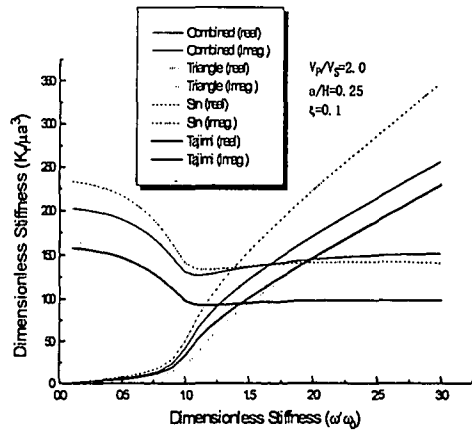


図7 地盤の複素剛性の比較

4. まとめ

基盤上に載る一様厚軟弱表層地盤中に埋めこまれている円筒剛体基礎のロッキングに対する地盤の動的剛性を擬似三次元モデルによって評価するにあたり、基礎からの拘束などによる地盤振動モードの変化を簡便で合理的な方法で解析に取り込むとともに、今後このモデルに対して、不整形地盤の振動特性を簡便な方法で考慮する可能性を示した。

すなわち剛体基礎近傍地盤では基礎からの拘束の影響により地盤は基盤に頂点をおく三角形の振動モードを呈するが、基礎から離れるにしたがい異なるモードで振動するようになる変化の要因を田治見の方法を用いて検討し、簡便な方法によって擬似三次元モデルにおける解析に取り込んだ。そして、地盤に対して三角形モードやSinモードのみを仮定した場合、田治見の方法による解との比較を行なった。その結果、三角形モードとせん断一次モードを結合した場合の解は三角形あるいはせん断一次のみを地盤に仮定した場合の中間に存在するが、田治見の方法による解と比較すると、特に実部において開きがみられた。

今後は、田治見の厳密なアプローチによる解との本論文で提案した方法との間に差が生じた原因についてさらに詳細な検討を加えた上で、不整形地盤に対する本手法の適用を行なう必要がある。

本研究は文部省科学研究費補助金による研究成果の一部を取りまとめたものである。

参考文献

- (1) Tamura C. and Suzuki T.: A Quasi-Three-Dimensional Ground Model for Earthquake Response Analysis of Underground Structures, 生産研究 Vol.39, No.1, pp.37-40, 1987.
- (2) Tajimi H.: Dynamic Analysis of a Structure Embedded in an Elastic Stratum, Proc., 4th World Conference on Earthquake Engineering, Vol.A-6, pp.54-69, 1969.