

審査の結果の要旨

論文提出者氏名

TAHGHIGHI

Hossein

地盤と構造物の動的相互作用は 1970 年代から地震工学の重要な課題として多くの研究者に連綿と研究されてきた学問分野であり、理想的な地盤・構造物系についてはその精緻な扱いと完成された数理モデルで成熟しきった分野であると見ることも出来る。しかし構造物の耐震設計は、予測しがたい入力地震動に対し、その物性を人間がある程度制御できる構造物の応答を合理的な規範の下に考えようとするものである。したがって情報の精粗が著しく異なるものが複合された状況でいかに合理的に相互作用を評価しえるのかの戦略構築が問われるのである。

最も成熟しきった相互作用解析の一つは地盤を半無限の領域を持つ線形弾性体とみなしその中に形状、剛性の異なる物体が嵌め込まれているという前提で、波動問題を解くものである。この方法は数理モデルとしての完成度が高く、波動の散乱・逸散の効果の重要性を浮き彫りにし、その合理的評価の方法を提供してきたという点で評価すべきである。しかし地盤と異質の剛性と質量を有する構造物近傍の地盤では地盤、あるいは構造物の非線形性の影響が強く、変形が大きくなれば剥離、すべりが圧倒的に卓越し、これらが大きく構造物の挙動を支配することになる。このような背景から杭・地盤の相互作用に関しては、杭の側面地盤を離散的なバネ（Winkler ばね）で支え、近傍地盤に特に顕著に発生する非線形性効果を組み込むモデル化が実務面で多用されてきた。そして、こうした非線形性の表現に重きを置く研究者のグループと、波動論に重きを置く研究者のグループはそれぞれの立場からの研究の深淵化には貢献していったが、それぞれの研究成果を融合し、相互作用解析の表現できる幅を広げようとする試みは決して盛んであったとは言えない。

本論文は杭基礎と地盤の相互作用解析において側方地盤を 3 次元的に無限に広がる層状の連続体として得られる厳密解（インピーダンスマトリックス）の対角項を Winkler バネの初期値と考え、非対角項の存在で生じる変位を、この Winkler ばねの外側端に生じる変位（外端変位：Far-end displacements）として加えこむ改良 Winkler モデルを提案するものである。対角項は当該深さでの杭近傍地盤の影響を最も直接的に反映する一方、当該部分以外が地盤地盤を通して当該部分の応答に与える影響（非対角項）は遠方地盤の連続体としての影響をより大きく反映していることに着目した表現法である。杭が地盤を押し引きする時に生じる非線形性は、したがってこの対角項のみを変化させることで表

現することになる。また Winkler ばねの外端変位は、結果的に杭の有効長(active pile length)に大きく依存していることが示された。この傾向は特に深さとともに拘束圧が上がり、土の剛性が大きくなる現実的な場合に顕著で、外端変位を有効長で無次元した深さの関数とすることで、幅広い地盤状況や、群杭の本数に対し一律に表現することが可能であることが示された。したがって地盤の非線形性の進展で有効長が変化すればこれに応じて外端変位も変化し、地盤の連続体としての影響を取り込みつつ、近傍地盤の変化を反映した合理的な相互作用解析に繋がっていく可能性がある。

本論文の構成は以下の通りである。

第 1 章は、1995 年の兵庫県南部地震や 1999 年の台湾集集地震、そして 2004 年中越地震の杭の被害事例や相互作用が関連したと思われる被害事例に触れ、研究の背景と、この論文で取り上げる課題について述べている。第 2 章はこれまでの地盤と構造物の相互作用研究のレビューを行っている。第 3 章は地盤の中にある杭基礎本体のモデル化について触れている。杭基礎は橋梁などでは、単独ではなく群杭として用いられることが多い。群杭はこれらを個別にモデル化して解析する手法が設計でも用いられるが、杭間距離が短い場合地盤に生じる破壊のパターンは、むしろ群杭を一体の杭とみなした状況に近く、したがってこれまで Konagai (2000, 2002, 2003)らによって等価梁モデルが提案されている。このモデルは多数の杭間の相互作用を厳密に解析した結果と極めて近い近似解を与えるものであることが証明されているが、杭が破壊していく状況でもこの概念を敷衍できるか検討しなければならない。そこで本章では慣性力相互作用で杭等部分が損傷を受けヒンジとなった状況を想定し、等価梁モデルを拡張し、厳密解との比較を行っている。その結果、このような状況でも群杭と地盤の相互作用を精度よく評価でき、以下に続く検討を一体化した等価な梁と地盤との相互作用問題として単純化できることが示された。

第 4 章では本論文の核心である側方地盤のモデル化の詳細に触れ、改良 Winkler モデルの提案を行っている。対象とする地盤は無限に広がる水平成層地盤であり、そのインピーダンスマトリックスは Tajimi, Shimomura (1976)の提案した薄層要素法を用いて求めている。また同じ手法によって、Winkler ばねの外端に加える外端変位ベクトルを算出すると、これが結果として群杭の有効長 (activepile length) で無次元化した深さに大きく依存しその他の 2 次的なパラメータの影響が小さいことも示されている。

第 5 章では Winkler ばねに非線形性を導入し、カリフォルニア大学バークレー校が中心になっている Pacific Earthquake Engineering Research Center で開発された OpenSees の有限要素法プログラム、単杭の応答解析プログラム、そして McVay らが行った遠心力载荷装置内での杭模型の载荷試験を用いて、その妥当性を検証している。

そして第 6 章では、本論文で検討した結果をとりまとめるとともに、今後の課題について述べている。

第 8 章は本論文の結論をまとめている。

以上、本研究は、地盤と杭の動的相互作用効果の評価において、波動の逸散効果から杭基礎近傍地盤の非線形性までを幅広く合理的に表現するためのブレークスルーに繋がる手法を提示したものであり、地震工学分野で重要な研究成果と評価できる。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。