

# 論文の要旨

題目 杭の杭軸方向挙動のモデル化と性能に基づく耐震設計への応用

(Modeling the pile-soil interaction in vertical direction and applicability to the seismic design based on the performance design)

氏名 兵頭 順一

第1章と第2章では、研究の背景と目的、既往の研究の整理を行った。

1964年の新潟地震以降、液状化に関する研究は幅広く行われ、その研究成果は各種基準の中で反映されてきた。しかし、平成7年(1995年)兵庫県南部地震では、多くの構造物に大被害をもたらした。また、埋立地では大規模な液状化が生じ、液状化に伴う地盤の流動によって杭基礎構造物に多大な被害が生じた。兵庫県南部地震後、構造物の耐震性能の照査では、2段階の地震動(レベル1地震動、レベル2地震動)を想定することが提言され、各種基準類に反映されてきた。また、国際的にもISO23469:2005では地盤基礎構造物への地震作用を定める際の指針を示しており、性能設計の考え方を導入している。そのため、近年、実務設計においても、二次元有限要素法(FEM)による動的解析が様々な施設の耐震性能照査に広く使われるようになってきている。

二次元有限要素法によって杭基礎構造物の解析を行う場合、杭と地盤の相互作用を適切に考慮することが重要である。耐震設計では、主として水平地震動に対して行うため、水平方向に関する杭と地盤の相互作用の研究が行われてきた。一方で、鉛直方向に関する杭と地盤の相互作用のモデル化は、十分に議論されていない。近年、耐震設計では、水平地震動と鉛直地震動の同時入力による解析が行われるようになり、鉛直方向の杭と地盤の相互作用のモデル化が重要となってきている。鉛直方向の杭の支持力の解析は、有限要素法(FEM)により多く行われてきている。有限要素法は、連続体の解析として最もよく使われる手法であり、三次元解析と二次元解析がある。三次元解析は実際の構造物を精度良くモデル化することができるが、二次元解析より非常に多くの計算時間がかかる。また、実際の設計では多数のパラメトリックスタディを行うことが多いため、特殊部の設計を除いて、実務的には二次元解析を使うことが多い。

そこで、本研究では、実務に多く使う二次元有限要素法の使用を想定し、鉛直方向の杭と地盤の相互作用のモデル化の提案を行うことを目的としている。

第3章では、二次元有限要素法による杭と地盤の杭軸方向相互作用のモデル化の提案を行った。まず、杭の先端支持力に関する数値解析プログラムの検証(Verification)の方法を提案した。提案手法は、杭頭への押込み力を強制変位と強制荷重で与える2パターンで解析を実施し、両者の荷重変位関係が一致することを確認する手法である。例題として、既往の杭先端のモデル(ModelA)を用いた検討を行った。その結果、既往の杭先端のモデル(ModelA)の要素挙動を安定させれば、検証を実施できることを確認した。

次に、杭の先端支持力に関して、既存の杭先端のモデル化(ModelA, ModelB)に問題があることを確認し、空洞拡張理論を参考として杭先端の地盤変形の影響範囲を考慮したモデル(ModelC)を提案した。杭先端の地盤変形の影響範囲は三次元解析により算定し、解析による影響範囲は既往の文献と整合することを確認した。そして、提案モデル(ModelC)を用いることで、既存のモデルの問題(メッシュサイズへの依存性、地盤の奥行き方向幅への依存性、杭先端非線形ばね要素の変位のダブルカウント)を解消することができた。また、提案モデルの適用性は、簡易モデルによる杭の押込み試験、原位置の鉛直荷重試験及び動的解析による被災事例解析により確認した。

杭の周面摩擦力は施工影響を考慮できる非線形ばね要素でモデル化した。モデル化の妥当性は杭の押込み試験・引抜き試験の再現解析により確認することとした。摩擦力の実測値をせん断強度とした場合、解析は実験を概ね再現することができ、地盤の強度定数をせん断強度とした場合、解析は実験とは合わない結果になった。その結果、調整係数(摩擦力の実測値による解析結果を地盤の強度定数による解析結果で除した値)を限られた事例で算定した。

第4章では、提案モデルの応用例として、提案した二次元有限要素法による杭と地盤の相互作用のモデル化を応用して、未達杭によって支持された建屋の傾斜を評価する方法を提案した。本提案では、未達杭

の杭基礎構造物の安定性を二次元解析で評価することができ、提案法が未達杭を有する構造物の耐震性能を評価する実務設計に使用できる可能性も示すことができた。

第5章では、本研究で用いた三次元有限要素法を用いて、締固め砂杭工法に関して密度増加と静止土圧係数  $K_0$  増加のそれぞれが  $N$  値増加に及ぼす影響について検討を行った。改良地盤の貫入抵抗に関する三次元解析を行い、締固め砂杭工法の改良地盤の  $N$  値増加を「①密度増加によるもの」と「②静止土圧係数  $K_0$  の増加によるもの」に分けて定量的に評価した。既往の実測例と比較しても、全体としてほぼ良好に説明することができた。また、一次元解析による事例解析を行い、静止土圧係数  $K_0$  を適切に設定あるいは測定できれば、従来より地盤改良効果を大きく評価できることが示唆された。

以上、実務に応用できる杭の杭軸方向挙動のモデル化手法を提案し、性能に基づく耐震設計に応用できることを示した。