

杭基礎構造物の被害分析及び耐震設計手法の現状と課題に関する研究

名古屋大学 工学部 社会環境工学科
建築学コース 護研究室 後藤圭佑

表1 過去の震災による杭基礎構造物被害の特徴及び、それを受けた設計法の変遷

1950年代、1960年代	設計では鉛直方向の検討のみであった。
1964年 新潟地震	液状化による直接基礎被害が顕著な一方、支持杭建物被害は比較的軽微であり、杭基礎が重要視され、研究が進展した。また側方流動による被害も見られた。
1968年 十勝沖地震	建物慣性力による杭頭の損傷が初めて確認された。
1974年 建築基礎構造設計基準の第二回改定	杭頭に作用する水平力に対する検討法が加わった。
1978年 宮城県沖地震	コンクリート杭において、建物慣性力による杭頭の被害が目立った。また、地下室を持つ建物は、持たない建物に比べ杭被害が軽微であった。
1984年 地震力に対する建築物の基礎の設計指針	杭が水平力に抵抗する構造体として明確に位置づけられ、杭頭に作用する水平力に対して曲げ・せん断を検討するようになった。また、地下室を持つ建物では杭の負担水平力を最大で70%まで低減できるとした。
1995年 兵庫県南部地震	杭基礎構造物に甚大な損傷が生じた。主要因は液状化、側方流動、建物慣性力の他、地盤変位による杭地中部の損傷が過去の地震に比べ顕著に多かった。
1998年 建築基準法改正の改定	水平力に対して二次設計が必要との認識が高まったが、実際は一次設計が義務付けられたのみだった。また性能規定型設計の試行が始まった。
2001年 建築基礎構造設計指針の改定	地盤変位に対する設計法の提案がされた。また、性能規定型設計への移行を受け、限界状態設計法が示された。

1.背景と目的

杭基礎構造物は過去の地震で様々な被害を受けており、その調査・分析から、耐震設計法に関する研究は着実に進展してきた。これらの成果は過去の被害と設計基準の関係に見ることができる。すなわち、現在の設計法の成り立ちや実状を理解する上で、設計基準の変遷を研究することは重要である。特に1995年兵庫県南部地震では杭基礎構造物が甚大な被害を受けたことから、地震時の地盤や杭の挙動をより精確に把握する必要性が認識された。また、建築基準法の改定で性能規定化が試行され、適切な性能評価のために実現象の解明が必要となった。しかし、これらの実現に向けての課題は数多い。現在の設計法には不確定要素が内在し、また、設計に取り入れられていない未解決の課題も残されている。

以上の背景から、本論ではまず過去の地震被害調査とこれより得られている知見をまとめる。次に、杭基礎設計基準の変遷を確認して、現在の杭基礎構造の耐震性能評価における課題を抽出することを試みる。また、課題の中から、水平抵抗評価に大きな影響を与える杭周地盤ばねの設定について詳細な解析的検討を行う。

2.杭基礎の耐震設計における課題

表1に過去の杭基礎被害と設計法の変遷を示す。この表より、設計法は過去の地震被害を反映して変遷している様子がよく分かる。現在は1995年兵庫県南部地震での甚大な被害を受け、杭基礎構造物に対して上部構造と同様に二次設計の必要性が認識されている。また、性能規定型設計への移行段階であり、その実現に向けて、杭のより詳細な応力評価法が必要とされている。しかし、地盤は不均質性が大きいため、ばらつきの多いデータを工学的判断の下で定式化して設計法に取り入れた背景があり、現在の設計法には妥当性を再度評価すべき課題がある。また、設計法に取り込まれていない研究段階の課題も多い。

本論文では、これらの課題を整理し、図1のようにまとめた。将来の設計法を検討するにあたり、このような現在の設計法の現状と課題を把握することが肝要である。

次節では、このような課題の詳細な検討例として、水平力に対する応力評価において重要となる杭周地盤ばねの課題について解析的検討を行う。

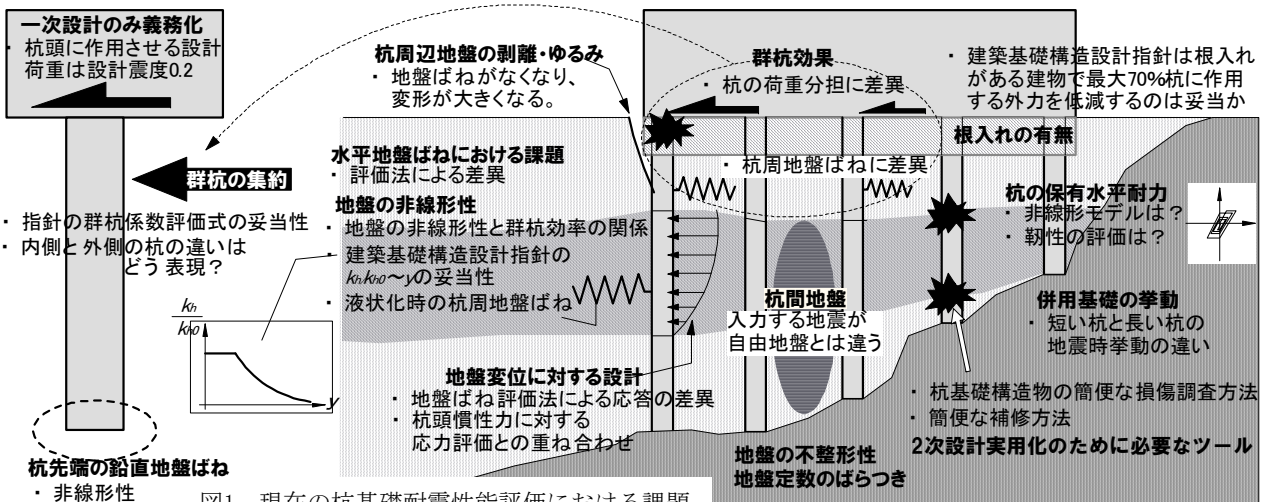


図1 現在の杭基礎耐震性能評価における課題

3.杭周地盤ばねにおける課題の検討

3.1 単杭の杭周地盤ばね評価法の検討

杭頭慣性力による杭の地震時応答を評価する際に用いる杭周地盤ばねの評価法には、建築基礎構造設計指針(以下、指針)が推奨する水平地盤反力係数を用いる方法(以下、700N法)や、地盤の弾性係数に基づく半無限弾性体の理論から求める方法(以下、Francisの方法)等があるが、その選択により、杭の応力評価結果が大きく異なる。そこで、杭周地盤ばねとして両者の方法による値を用いてChangの理論解により杭の応力を求め、薄層要素法による詳細な応力解析結果と比較、検討する。解析モデル及び地盤、杭の条件を図2、解析結果を図3に示す。

これらの結果から、薄層法とFrancisの方法は結果に近いが、700N法は変位、曲げモーメントともに応答を大きく評価している。ここで、地盤条件 $N=5$ (杭周地盤ばね値:小)、 $N=10$ (杭周地盤ばね値:大)の場合を比較すると、杭周地盤ばねが小さい程地盤の応答が大きくなる事が分かる。以上のことから、700N法は杭周地盤ばねを小さく評価することが分かる。

3.2 群杭係数の検討

指針では、群杭を検討する際に群杭効果を考慮し、単杭の杭周地盤ばね値に群杭係数 ξ を乗じて低減し、群杭各杭の平均的な杭周地盤ばね値を求めている。しかし、この評価法は杭径(B)に対する杭間距離(R)の比 R/B のみに依存し、他にも群杭効果に影響を及ぼす地盤条件、群杭本数がパラメータとして考慮されていない。また、内側と外側の杭での杭周地盤ばねの差異も考慮されていない。本論では 3×3 本、 5×5 本、 9×9 本の群杭でこの点について解析、考察した。使用したモデル、条件を図4に示し、群杭本数、 R/B 、地盤条件をパラメータとした、中央杭に対する隅杭、側杭、前後杭の杭頭せん断力比($V_s=100, V_s=400m/s$)を図5に示す。

図より、荷重分担は隅杭、前後杭、側杭、中央杭の順に大きく、群杭本数が多い程、また、地盤が軟らかい程それらの差異は顕著である。

次に、指針の評価式をこの結果と比較し、妥当性を見る。各杭の杭周地盤ばねの平均値を求め、単杭の値で除した結果を図6に示す。これは単杭に対する群杭各杭の平均地盤ばね値であり、指針の ξ に相当する。

この結果から、 R/B が小さいと、指針の評価式は群杭係数を小さく、つまり杭周地盤ばねを小さく評価することが分かる。また、杭本数が少ない程、地盤が固い程その差異は顕著である。 R/B が大きい範囲では比較的相関性が良いが、本数が多い場合は、評価式は杭周地盤ばね値を大きく評価している。指針では R/B が6以上で群杭効果はないとしているが、実際は $R/B=10$ でも、本数が多い場合は影響がある。従って R/B のみ考慮している指針の群杭係数評価手法には検討の余地がある。将来、数百本単位の群杭の検討が行われる可能性があり、群杭本数、地盤条件も考慮にいたれた評価式を設計手法に取り入れることが望まれる。

4.総括と今後の課題

本論では、杭基礎構造物の地震被害と耐震設計法の変遷を調べ、現状の設計法の課題を整理した。またその中でも水平地盤ばねにおける課題について解析的手法で再検討を行い、現在の設計手法で用いられる評価式は杭周地盤ばねを小さく評価すること、また、群杭係数の評価式は検討の余地があることが分かった。このように、過去の杭基礎被害から得られた多くの教訓が耐震設計法に取り入れられてきたが、現在の設計法においても解決すべき課題はまだ多い。さらに二次設計の導入や性能規定型設計に向かう動きの中で、より詳細に杭の実現象を把握する必要がある。従って、今後も、図1で示した他の課題について、詳細な解析的手法を用いて検討していく予定である。

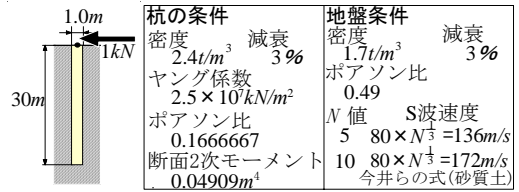


図2 3.1の解析モデル、杭及び地盤条件

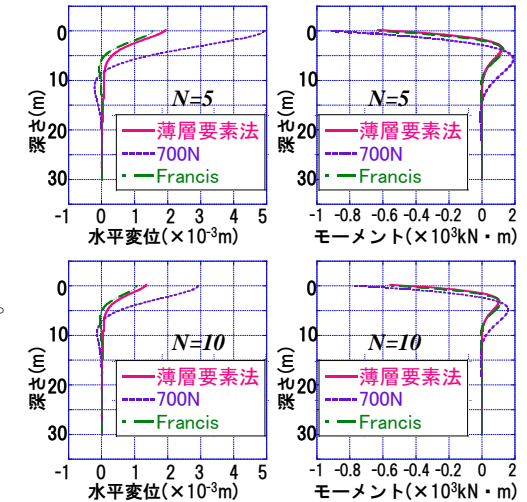


図3 地盤ばね評価法による杭応力結果の差異

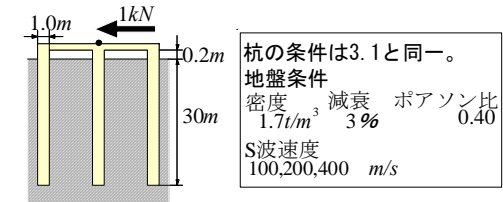


図4 3.2の解析モデル、杭及び地盤条件

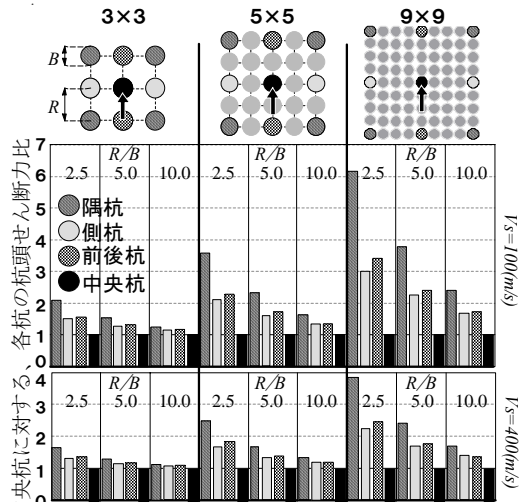


図5 杭位置の違いによる荷重分担の差異

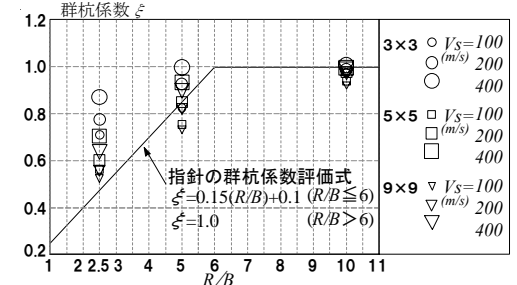


図6 指針の群杭係数評価法の妥当性検討