

論文の内容の要旨

論文題目 地盤中における鉄筋コンクリート杭の復元力
特性と性能評価手法に関する研究

氏 名 牧 剛 史

あらゆる地上構造物は何らかの形で基礎によって支持されている。従来、基礎構造物は過度の非線形を生じさせないような設計体系が採用されてきた。しかしながら、1995年の兵庫県南部地震において、基礎杭が損傷を受けたものも少なからず見受けられた。性能照査型耐震設計への移行も相まって、地震動の入口ともなる基礎構造物の挙動を正確に評価しうる手法の必要性が高まっており、杭基礎の大変形領域における挙動や、高変動軸力下における挙動を正確に把握しようとする動向が近年急速に進みつつある。本研究は、地盤中における杭の大変形領域における復元力特性と変形性状を明らかにし、これを精度良く追跡しうる解析手法の確立を念頭に置いて、従来手法（骨組みモデル）および詳細解析手法（3D-FEM）の評価を行うことを第1の目的とし、後者の詳細解析手法を杭の耐震設計に運用する際の適用性について、その精度と安全余裕度の点から定量的評価を行うことを第2の目的とする。すなわち、当該構造解析手法を耐震性能照査に適用する道筋をつけることを最終目標とするものである。

まず、地盤中における杭体の変形やそれに伴う杭頭復元力が、地盤条件や杭体諸元などの条件に応じて、どのような変動特性を示すのかといった観点から、特に高非線形領域における性状を把握するために、従来行われてきた杭頭載荷レベル（杭径の数 10%程度）を大きく上回る変位レベル（杭径の 90~100%程度）までを包含した静的正負交番載荷実験および動的正弦波載荷実験を行った。その結果、杭体に作用する地盤反力特性について、本実験で設定した緩詰め地盤では紡錘型、密詰め地盤ではスリップ型に近い履歴特性が観察された。この現象は、杭体-地盤界面における土圧がゼロ付近まで急激に低下することに起因する。また、Fig. 1 に示すように、杭体の損傷が最も大きくなる位置（最大損傷深さ）は系の相対剛性に依存し、杭体の剛性が地盤に対して相対的に大きくなると、最大損傷位置は地表面から深い方向へシフトすることが明らかとなった。さらに、Fig. 2 に示すような力の伝達メカニズムに最大損傷深さを考慮することにより、杭頭復元力を精度良く推定出来ることを示した。以上より、杭体に生じる最大損傷深さが、杭体と地盤との相互作用を顕著に表す指標であることが明らかになると共に、これを精度良く推定することの重要性を示した。

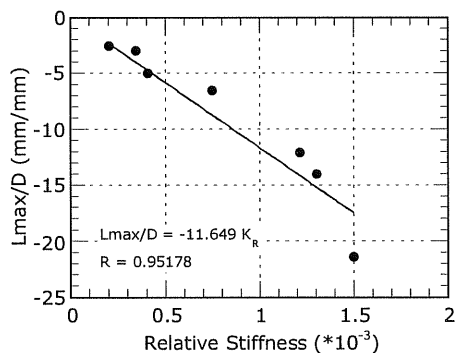


Fig. 1: 最大損傷深さの変化

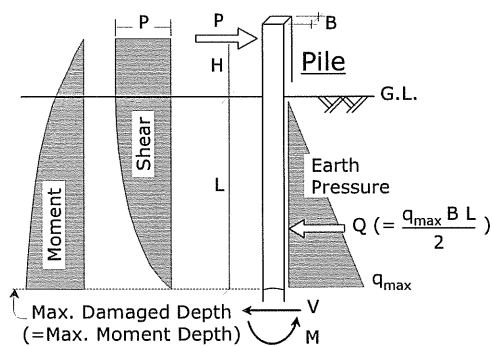


Fig. 2: 杭-地盤間の力の伝達メカニズム

次に、杭基礎の設計および性能照査に従来用いられてきた骨組み解析手法を用いて、上記の実験に対する再現性について検討した。地盤反力特性に完全弾塑性型の骨格曲線を規定した解析が、杭頭復元力を過小評価することから、杭体の繰り返し変形履歴に伴う付加的な地盤反力を考慮することが必要であると

言える。また、2種類の拘束圧算定法による解析結果から、地盤の3次元初期応力状態を忠実にパラメータへ反映させることの重要性を示した。さらに、地盤反力モデルの履歴特性を変化させ、系の減衰特性に着目した検討の結果、減衰特性の推定精度が杭体の変形レベルに応じて変化することが示された。以上の結果から当該手法を適用するに際しては、各種の局所的な現象を巨視的に考慮した地盤反力特性の設定が必要であることが示された。

上述したように、従来の骨組み解析手法（マクロモデル）によって、系の挙動を「精度良く」把握するためには、その力学モデルやパラメータの設定に何らかの巨視的な判断を必要とする。そこで、鉄筋コンクリートの構成材料であるコンクリートと鉄筋の厳密な材料モデルに立脚したファイバーモデルと、地盤材料の非線形性を考慮した立体要素に基づいた3次元有限要素解析コードCOM3（マイクロモデル）による解析的検討を行った。このような詳細解析手法は、局所的な応力状態を力学的に明確なモデルによって再現可能であるという利点を有している。本研究においては、前述した実験結果の再現性について検討すると共に、特に杭体背面の主働土圧がほぼゼロとなる現象（以下、この現象を「界面剥離」と称する）や初期受働土圧、杭体近傍地盤の締め固めといった局所的な現象を界面モデルに取り込むことによって、これらが杭体の挙動に及ぼす影響について考察を行った。Fig. 3に示すように、杭体降伏以前の比較的低い変位レベルにおいては、当該解析手法の適用性が確認された。しかしながら、降伏以後の大変形領域については、地盤ひずみレベルの増大と共に推定

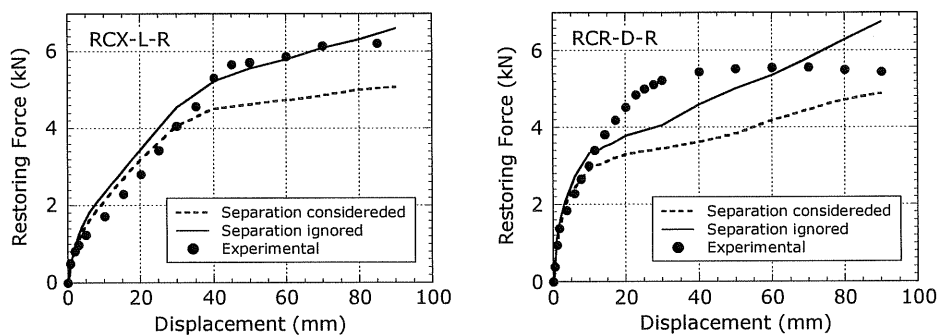


Fig. 3: 杭頭復元力-変位骨格曲線の例

精度が低下することが明らかとなった。また、杭体―地盤間の界面剥離現象が及ぼす影響に特化して、地盤条件と杭体諸元を種々に変化させたパラメトリック解析を行った結果、地盤中における RC 単杭の杭頭復元力特性は Fig. 4 のように杭体断面特性と最大損傷深さによって一意的に決定されるという、Fig. 2 の仮説を裏付ける結果を得た。界面剥離などの局所的な挙動は最大損傷深さのみに反映され、その結果として杭頭復元力特性が変化するというメカニズムが解析的に明らかとなった。

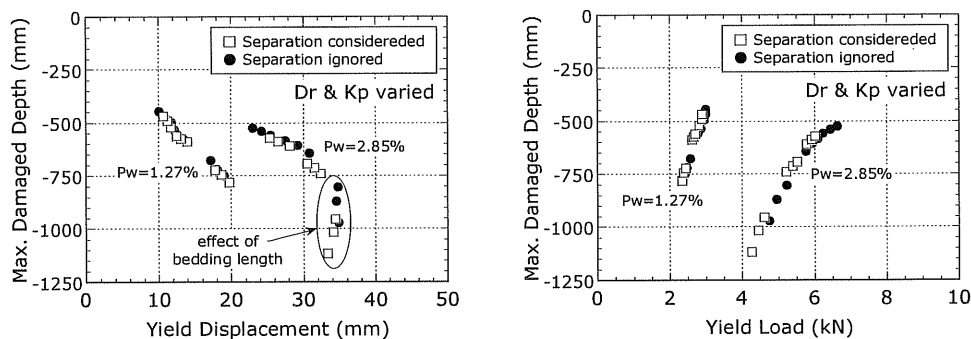


Fig. 4: 最大損傷深さと杭頭降伏変位および降伏荷重の関係

以上の解析結果をふまえて、当該手法を杭基礎の耐震性能照査手法として運用する際に、構造モデル化上の誤差に対する安全係数として見込むべき数値、すなわち構造解析係数を具体的に提示することを試みた。耐震性能 I における応答変位に対する構造解析係数は、界面剥離や締め固め等の局所的な挙動を考慮することによって 1.0 へ近づくことが明らかとなった。また、耐震性能 II において、杭体に発生する応答せん断力に対する構造解析係数は、設計上の許容塑性率に応じて変動するが、界面の局所挙動を考慮することによって総じて危険側へ遷移し、最大 1.5 程度まで増大する。しかしながら、応答変位については局所挙動を考慮することで逆に安全側へ遷移し、ほぼ 1.0 程度と出来ることが示された。以上、杭基礎に要求される各耐震性能に対して、本解析手法を性能照査に適用する際の安全係数を、照査項目毎に提案した。