

論文要旨

1995年兵庫県南部地震においては、杭基礎建物の被災調査や被災シミュレーション解析による被災要因の分析が精力的に行なわれた。これを契機として、杭基礎建物に対する非線形地震応答性状の把握や、地盤－杭－建物連成系の実用的な非線形地震応答解析手法の開発の必要性が高まった。また、1995年兵庫県南部地震以後、性能規定型設計への移行が始まり、杭基礎構造の耐震設計についても、今後は緩やかではあろうが、世の中の趨勢として、性能規定型設計を実施する方向へ進んでいくものと推察される。今後、杭基礎構造の性能規定型設計が実施されたとした場合の新しい課題として、塑性化を含めた杭の変形量（あるいは塑性率）を明確に表現した設計法の確立が考えられる。

本論文は、以上のような背景を踏まえて、杭基礎建物の強震時挙動が評価できる地盤－杭－建物連成系の実用的な非線形地震応答解析手法を構築すること、強震時における杭基礎建物の非線形応答性状や耐震性能を包括的に把握すること、また、設計的観点から、杭基礎の性能規定型設計体系への移行を想定して、杭の変形性能を考慮した実用的な設計法を提案することを目的として行なった研究である。

本論文は、以下に示す全8章より構成されている。

- 第1章 序論
- 第2章 質点－ばね系モデルによる地盤－杭－建物連成系の非線形地震応答解析手法の構築
- 第3章 簡便法による地盤ばね定数の質点－ばね系モデルへの適用性の検討
- 第4章 地盤－杭－建物連成系の非線形地震応答性状に関する検討
- 第5章 杭種や杭頭接合条件の異なる杭基礎建物の非線形地震応答性状や耐震性能に関する検討
- 第6章 1995年兵庫県南部地震において被災した杭支持建物のシミュレーション解析と杭基礎の耐震性能に関する検討
- 第7章 杭の曲げ耐力と最大応答塑性率に関する解析的検討
- 第8章 結論

第1章では、まず、近年の杭基礎建物の状況や地震被害、あるいは性能規定型設計体系への移行の動向等から、杭基礎建物の耐震設計における問題点や課題について指摘することにより、本研究を行なうに至った背景を述べるとともに、本研究の目的について明記した。次に、杭基礎建物の動的相互作用に関する既往の研究について概説し、杭基礎建物の非線形動的相互作用や耐震性能に関わる解析的研究や、実用的な解析法の開発が、発展途上にあることを示して、本研究の位置づけと意義を明確

にした。次に、本研究の目的を達成するために実施した研究項目について、章ごとに概説した。最後に、各章の対応関係について、フロー図を用いて示した。

第2章では、質点-ばね系のスティックモデルによる地盤-杭-建物連成系の非線形地震応答解析手法の構築方法について述べた。まず、質点-ばね系のスティックモデルにおける数学モデルとその解析方法の概略について述べた。質点-ばね系のスティックモデルは、モデル自体が簡便であるが故に、群杭効果を考慮した地盤ばねの設定方法、ならびに地盤反力など各部における非線形性のモデル化方法に十分な注意を払う必要がある。そこで、本章では、まず動的サブストラクチャー法の容積法に基づく、地盤-杭-建物連成系の運動方程式の導出を行い、地盤ばねが3次元薄層法などの理論解より得られることを示した。次に、杭、地盤ばねの集約化、および集約された地盤ばねの、簡便性に配慮した、軸ばねとせん断ばねへのスカラー化の方法について示した。そして、簡単な数値実験により、地盤ばねの集約化と、軸ばねとせん断ばねによるスカラー化の精度や、その有効性について検討した。次に、軸ばねとせん断ばねの非線形パラメータの設定方法について示した。そして、本解析手法は、自由地盤の非線形性と、杭周辺地盤の非線形化に伴う杭から逸散減衰の非線形性を、軸ばね、せん断ばねの復元力特性に考慮している点が特徴であることを述べた。また、これら地盤の材料非線形性に加えて、杭と周辺周辺地盤間の幾何学的非線形性、すなわち剥離を同時に考慮できる復元力モデルも提案した。最後に、鋼管杭の遠心模型実験と本解析手法によるシミュレーション解析において、両者が良好な対応関係を示している結果を紹介することにより、本解析手法の妥当性を示した。また、軸ばねの復元力特性を規定する極限地盤反力の算定における、群杭効率に関わる有効杭本数の設定方法に、問題が残されていることを述べた。

第3章では、経験式等に基づく簡便な地盤ばね算定手法の、質点-ばね系モデルへの適用性について検討した。具体的には、建築基礎構造設計指針(2001)^[126]に示された、N値で表される簡便な水平地盤反力係数による算定式を簡便法、3次元薄層法を用いた算定方法を精算法と位置づけ、両手法から得られる地盤ばね剛性を、単杭と群杭の場合で比較することにより、簡便法の適用性や問題点について検討した。その結果、単杭における地盤ばね剛性では、砂質土で9倍程度、粘性土で、N値に依存して、18~24倍程度、精算法の方が簡便法に比べて大きいこと、群杭の場合、精算法と簡便法での地盤ばね剛性の比は、杭本数や杭間隔比だけではなく、地盤タイプや深さ方向でも異なる傾向が見られること等を明らかにした。また、地盤条件によっては、簡便法による地盤ばね剛性でも、簡単な補正を行なうことで、適用可能であることを示した。

次に、地盤ばね剛性の他に、簡便法により求めた粘性減衰係数、および極限地盤反力係数を用いて、仮想杭基礎建物の非線形地震応答解析を行い、地盤ばねの各非線形パラメータが、連成系の地震時応答に与える影響について検討した。その結果、本章で行なった検討範囲内では、簡便法による地盤ばねの各非線形パラメータが、連成系の地震時応答に与える影響は小さいことを示した。

第4章では、第2章で構築した解析手法を用いて、非液状化地盤に建つ仮想杭支持RC建物を対象とした非線形地震応答解析を実施した。そして、地盤の非線形性、建物の非線形性、杭の非線形性のそれぞれが、地盤-杭-建物連成系の地震時応答に与える影響について、定性的検討を行なった。

まず、自由地盤の非線形性の影響については、建物と杭を弾性とし、入力地震動の最大地動加速度 A_g を50Gal、100Gal、200Galと変えることにより、段階的に検討した。これより、 A_g の増加に伴い、地盤の非線形化が進展するため、 A_g で基準化された建物応答や、杭頭インピーダンスは低減すること、対照的に、 A_g で基準化された杭の応答は、地盤変形の増大に伴い増大すること、さらには、建物への入力損失効果は、 A_g にほとんど影響されない事などを明らかにした。次に、建物、及び杭の非線形性の影響については、 A_g が200Galの場合について検討した。その結果、建物の非線形化により、建物応答は低減され、杭応答については、建物慣性力による応答には低減が見られるが、地盤震動による応答は相対的に大きくなること、杭頭インピーダンスにおける剛性低下は、建物弾性時に比べて少ないこと、杭の非線形性が、建物の応答に与える影響は非常に小さいことを明らかにした。杭と杭周辺地盤の剥離が地盤-杭-建物連成系の地震時応答に与える影響については、剥離を考慮した地盤ばねの復元力モデルを新たに提案し、これを用いた検討を行なった。まず、提案した復元力モデルを用いて、単杭の杭頭加振実験のシミュレーション解析を行ない、両結果の良好な対応関係を確認することにより、同復元力モデルの有効性を示した。また、仮想杭支持建物の非線形地震応答解析を行ない、杭と杭周辺地盤の剥離が建物、杭の応答に与える影響は小さいことを明らかにした。最後に、自由地盤の剛性低下や軸ばねの剛性低下に伴う逸散減衰効果の低減が、地盤-杭-建物連成系の地震時挙動に与える影響について検討し、自由地盤の剛性低下は、建物や杭の応答に影響を与えるが、逸散減衰効果が、建物や杭の応答に与える影響は小さいことを明らかにした。

第5章では、杭種や杭頭接合条件が異なる杭基礎建物の、強震時における振動性状や耐震性能の違いについて検討した。検討では、液状化を考慮しない軟弱地盤、および液状化地盤に建つ仮想9層RC造杭基礎建物を対象とし、杭種としてはRC杭と鋼管杭、杭頭接合条件としてはピン接合と剛接合を想定した。はじめに、動的な観点から、質点-ばね系モデルを用いた地盤-杭-建物連成系の非線形地震応答解析を行い、杭種や杭頭接合条件が異なる場合の連成系の応答性状について比較、検討した。建物応答については、RC杭、鋼管杭いずれの場合も、杭頭接合条件の影響は小さいこと、杭応答については、地盤震動による応答は、杭頭接合条件の影響を受けにくいこと、ピン接合における地中部最大曲げモーメントは、剛接合における杭頭曲げモーメントよりも小さくなること、杭頭における建物慣性力による応答変位は、ピン接合の方が大きいこと等の結果を得た。さらに、杭頭せん断力と杭と地盤の相対変位との履歴曲線から、ピン接合、あるいは鋼管杭の方が、履歴吸収エネルギー効果が大きいことを示した。また、剛接合である鋼管杭が塑性化した場合には、変形性能の面で留意する必要があることを指摘した。

次に、静的な観点から、RC 杭に着目して、フレームモデルを用いた杭基礎の静的増分解析を実施し、杭頭接合条件が異なる場合の杭基礎の保有水平耐力と変形性能について比較、検討した。その結果、剛接合の場合、保有水平耐力は大きいですが、逆に変形性能が小さく、ピン接合の場合、保有水平耐力は小さいが、変形性能は、各接合条件で同じ終局状態を想定すると、剛接合よりも大きくなる傾向にあることを明らかにした。

第 6 章では、1995 年兵庫県南部地震により被災した、埋立地に建つ被災状況の大きく異なる RC 造杭支持建物と S 造杭支持建物について、本論で構築した非線形地震応答解析法による被災シミュレーション解析を行ない、動的相互作用の観点から、被災要因を考察した。また、フレームモデルを用いた杭基礎の静的増分解析を行なって、杭の損傷過程を辿ることによっても、両建物の被災要因を検討した。静的増分解析では、杭頭せん断力の他に、地盤の強制変位も荷重として考慮した。その結果、両建物の被災状況を、地震応答解析と静的増分解析により、ある程度再現することができた。そして、両建物の被災要因を、建物の規模や耐震性能、地盤の卓越周期や非線形性の影響等によって説明できることを示した。また、本論で構築した非線形地震応答解析法と、静的荷重解析法を組み合わせることにより、杭支持建物の耐震性能を総合的に評価することが可能であることを述べた。

第 7 章では、まず、変形性能を考慮した杭の設計法を示した。この設計法では、上部建物の構造特性係数に相当する、杭の曲げ耐力と応答塑性率の関係が必要となる。そこで、杭の降伏曲げ耐力に関する係数を、「耐力低減係数」と定義し、杭の応答塑性率と耐力低減係数の関係式の推定を試みた。検討は、鋼管杭と RC 杭を対象とし、地盤—杭—建物連成系の非線形地震応答解析による経験的手法に基づいて行った。はじめに、模擬地震波 5 波による地震応答解析結果から、杭の耐力低減係数と応答塑性率の関係を回帰することによって、RC 杭と鋼管杭に対する推定式をそれぞれ導出した。次に、推定式が実地震波を用いた地震応答解析結果を包絡することを示すことにより、同推定式の妥当性を明らかにした。さらに、本推定式を用いて算定される杭頭せん断力を作用させた場合の、杭の曲げモーメント分布を、通常、杭の設計で用いられる静的増分解析や弾性支承梁による解法を用いて算定した。そして、それらの結果が、地震応答解析結果と比較的良好に対応していることから、本推定式の設計への適用性を確認した。

本章で示した推定式は、2 次設計を想定し、入力加速度を 400Gal とした場合の検討結果であるため、実際の適用にあたっては、2 次設計のレベルを越える地震動が生じた場合の杭の損傷レベルも考慮に入れた上で、2 次設計における杭の損傷レベル（塑性率）を設定していく必要があることを注意点として述べた。

第 8 章では、第 2 章から第 7 章で得られた結論を総括して要約するとともに、今後の課題や展望について記すことにより、本論文の結びとした。