

軟弱地盤地域における杭支持構造物の 耐震設計について

秋吉 卓¹・淵田邦彦²・松本英敏³・尻無濱昭三⁴

¹正会員 工博 熊本大学 教授 工学部環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39-1)

²正会員 工博 八代工業高等専門学校 助教授 土木建築工学科 (〒866-8501 八代市平山新町2627)

³正会員 熊本大学 技術専門職員 工学部技術部 (〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39-1)

⁴正会員 博士(工学) 鉄建建設株式会社 技術研究所 (〒286-0825 千葉県成田市新泉9-1)

軟弱な表層地盤の剛性を高めると、地表面構造物への入力地震動の強度も比例的に増大する。すなわち、地盤改良の程度により地盤の固有周期・増幅特性が変動するため、地表面の応答加速度も追従することから、これを受ける構造物の応答スペクトルは、地盤と構造物の固有周期の2変数により表示されることになる。これより応答スペクトルを最小化する両固有周期から、地盤と構造物の動特性の改良による耐震設計法が考えられる。本研究は、1995年兵庫県南部地震における液状化発生地域の建築物被害事例について、サンドコンパクションパイル工法で地盤を締固めることにより、液状化発生を抑えかつ杭基礎の破壊を防ぐという条件を満足させながら、応答スペクトルによる設計法の可能性について検討したものである。

Key Words : aseismic design, pile-supported building, liquefaction, sand compaction pile, response spectra

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、沿岸部など軟弱地盤地域において地盤の液状化や側方流動による建物基礎部の被害発生および基礎部破損に伴う建物の傾斜などの被害が見られた¹⁾。特に、軟弱地盤ではその剛性に応じて、固有周期や増幅特性が変化することから、地盤-基礎系と上部構造物系の振動特性が不均衡となると、その片方あるいは両方が被災してしまい、合理的な耐震設計法や評価手法が望まれている。また、地盤系の振動特性改善を目的とした地盤改良に関してもその施工条件などが対応付けられていない場合が多い。

そこで、本研究では、筆者らが提案している応答スペクトルを利用した地盤-構造系の耐震設計法²⁾を用いて、サンドコンパクションパイル(SCP)工法による地盤改良について、液状化防止と杭基礎の破壊を起こさせないという制約条件下で、SCPの最適な施工条件(締固め時間)の設定に観点をおいて、1995年兵庫県南部地震で被災した杭基礎建物への適用について検討したものである。

2. 応答スペクトルを用いた耐震設計法の概要

本研究では、表層地盤-杭基礎系を2次元平面ひずみで有限要素に分割したモデルを対象とする。表層地盤の地震応答解析は、Biotの2相混合物理理論に基づき、構成式として井合らの多曲面せん断機構モデル³⁾を用い、2次元有効応力解析プログラム「NUW2」⁴⁾として筆者らが開発したものを用いる。また、液状化対策工法としてSCPによる地盤改良を行った場合については、筆者らが開発した地盤改良工法のシミュレーションプログラム「WAP3」⁵⁾を用いる。図-1に提案する応答スペクトルを用いた耐震設計法の流れを示す。SCP工法による地盤改良効果を「WAP3」でシミュレートして、2次元有効応力解析プログラム「NUW2」で地盤の地震応答解析(液状化解析)を実施し、さらに、地表面における地盤の応答を入力として、地表面上の1自由度系構造物の応答スペクトルを求める。ここで、表層地盤の平均固有周期(以後、地盤固有周期) T_0 と1自由度系構造物の固有周期(以後、構造物固有周期) T_s をキーパラメータとして、2元の応答スペクトルを作成

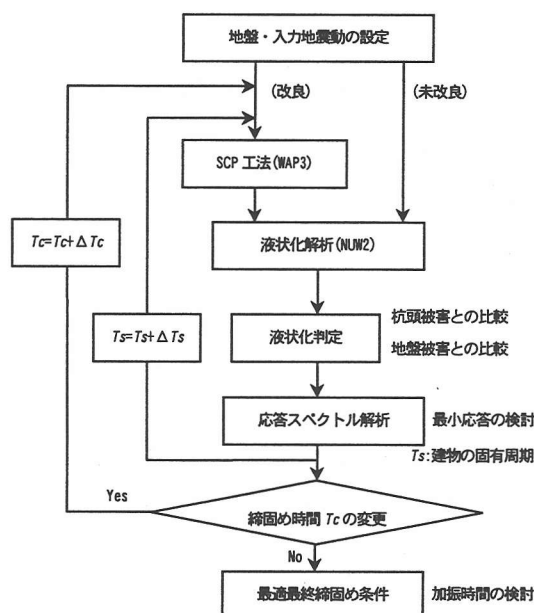


図-1 提案する耐震設計法の流れ

すると、 T_G と T_S の両固有周期の組み合わせから、上部構造物の地震応答を把握することができる。なお、地盤固有周期 T_G は、SCP による締固め加振時間 T_c による地盤剛性の変化を反映しており、この T_c と上部構造物の応答を対応付けることが可能となる。

3. 被害事例に対する最適耐震設計

(1) 被害事例の抽出

本研究では、被害事例として、1995年兵庫県南部地震における建築基礎の被害調査事例報告書⁹⁾およびそれを基にして詳細に整理した妹尾らの研究⁷⁾を参照した。特に、妹尾らの研究では、地盤の固有周期 T_G と構造物の1次固有周期 T (T_S) により、杭基礎建物の被害分布が図-2のように公表されている⁷⁾。

本研究で対象とした事例は、図-2中の被害事例から抽出したもので、図-3に示す被害事例No.1, No.42およびNo.18である。杭基礎はそれぞれPC杭、AC杭および鋼管杭となっている。また、被害については、杭頭部破損や曲げ変形が発生し、上部構造物も傾斜しており、その原因も液状化あるいは側方流動となっている。

(2) 解析概要

解析では、入力地震波として1995年兵庫県南部地震の神戸ポートアイランドで観測された加速度記録(GL-32m, NS成分)を最大加速度振幅を540galとして基盤に

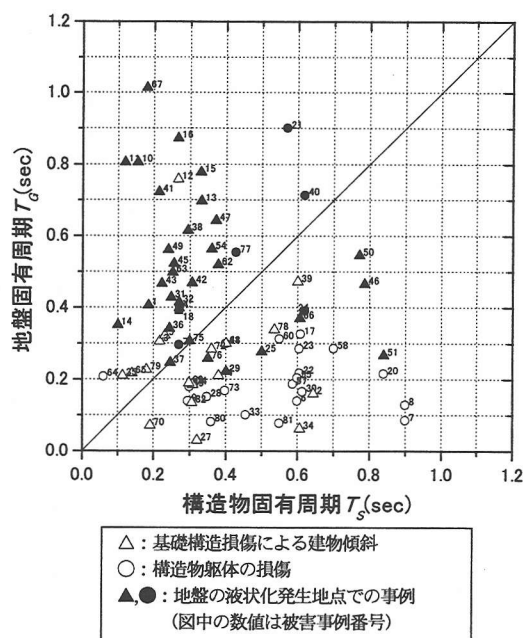


図-2 杭基礎被害分布

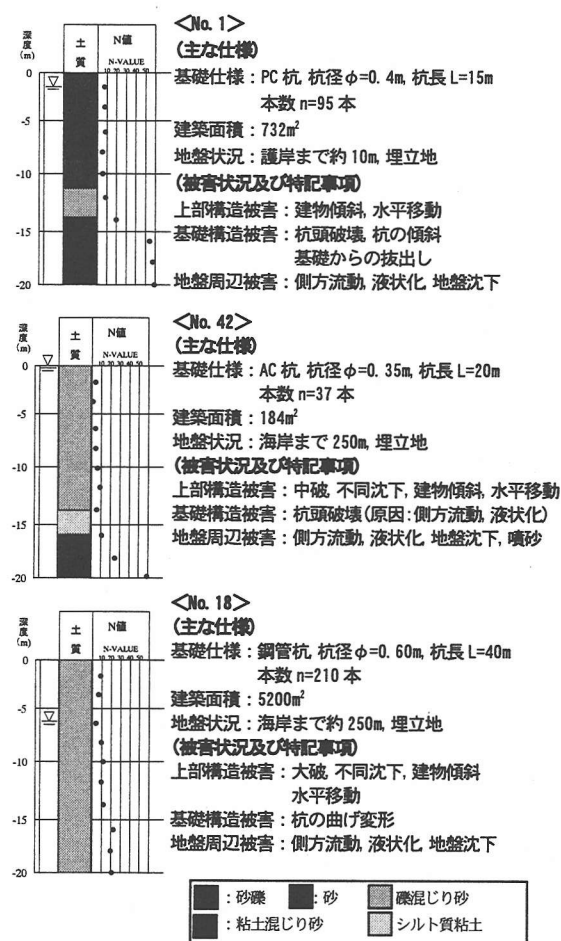


図-3 対象とした被害事例

入力した。また、解析対象とした地盤領域は水平方向24m、鉛直方向20mとし、水平方向4m、鉛直方向2mごとに分割している。液状化解析に用いる地盤定数は、

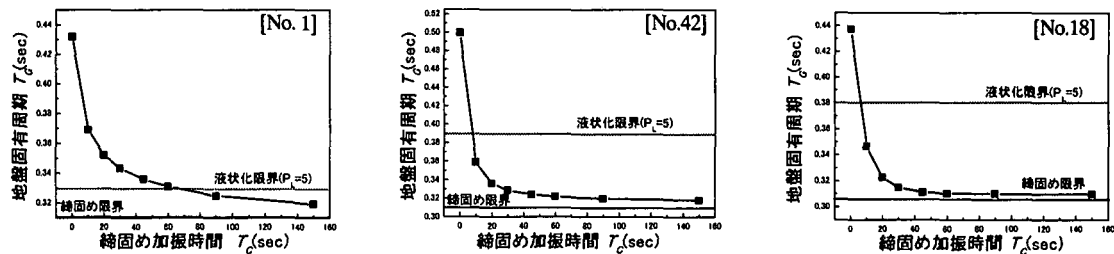


図-4 締固め加振時間 T_c と地盤固有周期 T_g の関係

文献8)を参考にした。杭基礎は線形のはり要素として、地盤要素間に組み込み、地盤と杭との相対変位は生じないものとしている。さらに、上部構造物を水平方向のみ変位する1自由度系とするために杭頭は固定とした。また、杭については、その配置が不明であることから、建物形状を等価な正方形と仮定し、杭の配置も正方形配置として、全てを中央に縮約した単杭として2次元面内にモデル化している。また、SCP工法による振動締固め条件は、加振振動数 $f_c=9.3\text{Hz}$ として現場で施工されているような一般的なものを用いた。

(3) SCP 工法による地盤改良効果

SCP工法を考慮した地盤の地震応答解析結果を基にした、1ステージごとの締固め加振時間 T_c と地盤固有周期 T_g の関係を図-4に示す。今回の解析では、1ステージ当たりの締固め加振時間 T_c を0, 10, 20, 30, 45, 60, 90, 150secとしている。なお、 $T_c=0\text{sec}$ は地盤未改良である。また、ここでの液状化限界は、液状化指数 $P_L=5$ として、また、各地盤の最小間隙比に対応する締固め限界を、それぞれ図中に示している。

図-4より、それぞれの被害事例の地盤について、液状化の発生を防止する締固め加振時間 T_c と地盤固有周期 T_g を把握することが可能となり、被害事例No.1では、締固め加振時間 $T_c=90\text{sec}$ 、地盤の固有周期は $0.310 \leq T_g \leq 0.330\text{sec}$ 程度、No.42では、 $T_c=10\text{sec}$ 、 $0.310 \leq T_g \leq 0.390\text{sec}$ 程度、No.18では、 $T_c=10\text{sec}$ 、 $0.305 \leq T_g \leq 0.380\text{sec}$ 程度となる。

(4) 杭基礎の応力に関する検討

地震応答解析結果に基づいて杭基礎に発生する曲げ応力・せん断応力から、杭が破壊しない最小の締固め加振時間 T_c' を検討する。図-5に各事例における杭基礎の応力を示す。また、図中の縦の実線はそれぞれの杭種に応じた許容応力であり、この値を超えると杭は破壊しているものとした。なお、今回の解析では、各杭の最大応力の算定に位相は考慮していない。

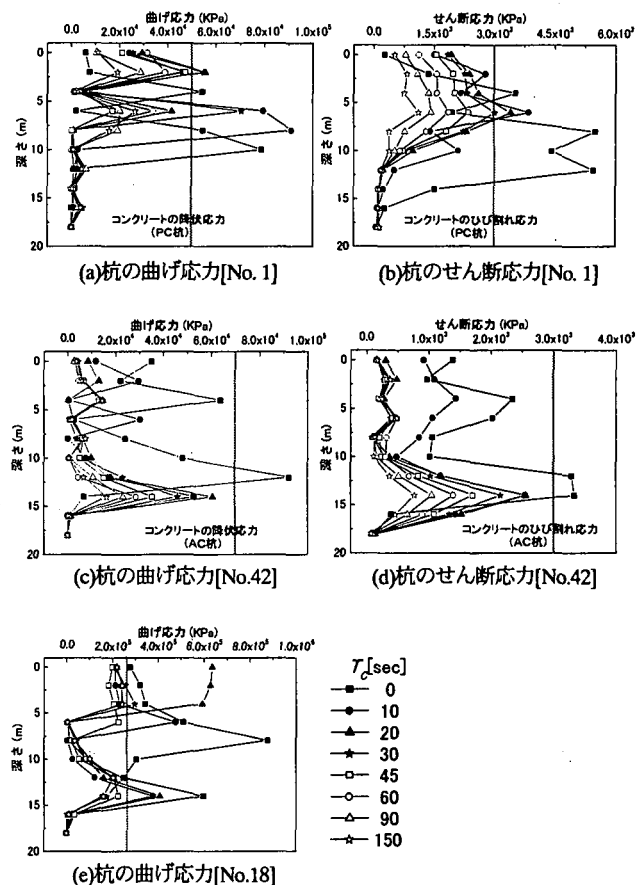


図-5 杭の最大応力

図-5から、杭が破壊しないような最小の締固め加振時間 T_c' は、被害事例No.1の場合は、 $T_c'=45\text{sec}$ で、地盤の固有周期 T_g' は 0.336sec 程度となる。同様にNo.42では、 $T_c'=10\text{sec}$ 、 $T_g'=0.359\text{sec}$ 、No.18については、 $T_c'=45\text{sec}$ 、 $T_g'=0.311\text{sec}$ となる。

(5) 応答スペクトルによる地盤-基礎-上部構造物の最適設計

地表面の応答加速度を入力として上部構造物の応答スペクトルを求め、地盤と上部構造物の固有周期から応答を評価する。図-6に地盤固有周期 T_g と構造物固有周期 T_s を軸として、コンター表示した加速度応答および変位応答スペクトルを示す。液状化の防止と杭基礎の破壊防止という観点からは、液状化が発生しない地

盤の固有周期 T_G の範囲を決定して、その範囲内で上部構造物の応答スペクトルが最小となるように締固め加振時間を決定することになる。

a) 被害事例 No. 1 の検討結果

前節で示した地盤の固有周期 T_G の制約範囲は、 $0.310 \leq T_G \leq 0.330 \text{ sec}$ 程度となる。杭基礎の破壊を避けることのできる範囲は $T_G \leq 0.336 \text{ sec}$ となり、液状化防止と杭基礎破壊防止の両方の観点から、 $0.310 \leq T_G \leq 0.330 \text{ sec}$ の範囲となる締固めをすれば良い。この事例では、液状化防止の振動締固め加振時間 T_C が制約条件となり、 $T_C=90 \text{ sec}$ が最適な締固め条件となる。

b) 被害事例 No. 42 の検討結果

前項と同様に、No.42 の場合は、液状化防止の地盤固有周期 T_G が $0.310 \leq T_G \leq 0.390 \text{ sec}$ の範囲内となり、杭基礎の破壊を避けることのできる地盤固有周期の範囲は $T_G \leq 0.359 \text{ sec}$ となり、最適な締固め条件は $T_C=10 \text{ sec}$ となる。

c) 被害事例 No. 18 の検討結果

前項と同様に、液状化防止の地盤固有周期 T_G が $0.305 \leq T_G \leq 0.380 \text{ sec}$ の範囲内で、杭基礎の破壊防止の最適な締固め条件は、 $T_G \leq 0.311 \text{ sec}$ となり、杭基礎の破壊防止における振動締固め加振時間 $T_C=45 \text{ sec}$ が最適な締固め条となる。

以上の被害事例の3例について、本研究で提案するサンドコンパクションパイル工法の最適な施工条件（締固め加振時間）で設計可能であることを示した。また、上部構造物の応答特性は、対象とする構造物の固有周期の選択から、簡便に応答を把握することができる。

4. おわりに

1995 年兵庫県南部地震における液状化発生地域の杭基礎建物の被害事例について、サンドコンパクションパイル工法で地盤を締固めて、液状化発生を抑えかつ杭基礎の破壊を防ぐという条件下で、提案する応答スペクトルを利用した耐震設計法を用いて、最適な施工条件（締固め加振時間）を把握できることを示した。今後の課題としては、杭基礎被害に及ぼす側方流動の影響や粘性土に対する SCP 工法以外の地盤改良工法による検討などがあげられる。

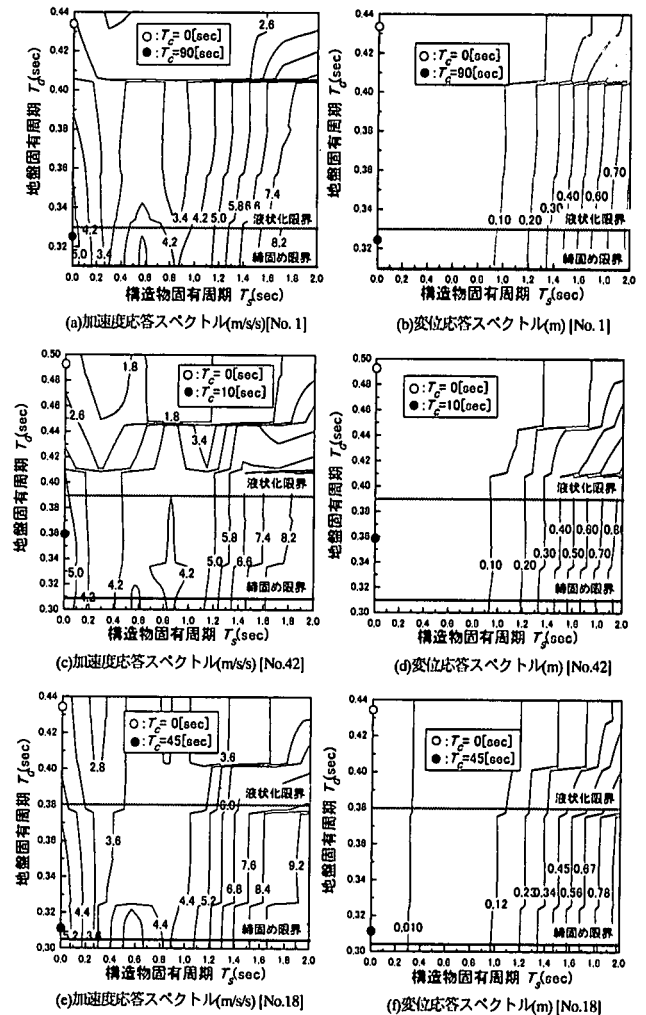


図-6 地盤固有周期 T_G と構造物周期 T_s による
応答スペクトル

参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告総集編，社団法人日本建築学会，2000。
- 2) 秋吉 卓ほか：地盤の液状化を反映した応答スペクトルの耐震設計への反映，土木構造・材料論文集，第16号，pp.117-124, 2000。
- 3) Iai, S. et al., Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, JSSMFE, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992。
- 4) Akiyoshi, T., et al., Liquefaction analysis of sandy ground improved by sand compaction piles, Int. J. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.12, No.5, pp.299-307, 1993。
- 5) Akiyoshi, T., et al., Simulation of Sand Compaction Pile Method, Proc. of 9th Japan Earthquake Eng. Symposium, pp.949-954, 1994。
- 6) 日本建築学会近畿支部基礎構造部会・兵庫県南部地震建築基礎被害調査委員会：兵庫県南部地震による建築基礎の被害事例報告，1996。
- 7) 妹尾史郎ほか：兵庫県南部地震における建築・基礎被害の概算固有周期による検討(その1, その2)，日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)，B-2, pp.29-32, 1999。
- 8) 森田年一ほか：液状化による構造物被害予測プログラム FILP において必要な各種パラメタの簡易設定法，港湾技術研資料，No.869, 1997。