

地盤改良による杭基礎—構造物系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)

1995年兵庫県南部地震では、沿岸部の軟弱地盤における液状化のため構造物躯体よりも杭基礎に被害が集中した。本研究では、兵庫県南部地震における液状化による杭被害実例について、周辺地盤をサンドコンパクションパイル(SCP)工法で締固める地盤改良によって、液状化と杭破壊を防ぐ条件の下で耐震設計が可能かどうかについて数値解析により検討した。地盤は水で飽和した2相系とし、側方は吸収境界として、非線形有効応力解析法により解析を実施した。入力は、神戸ポートアイランドでの記録波を用いて、応答スペクトルからの検討を行った。数値解析の結果、SCPによる地盤改良は、設定した条件を満足することが分かったが、粘土層が厚いと締固めが困難なため設計不能となるケースも認められた。

Key Words : aseismic design, pile foundation-structure system, response spectra, liquefaction, sand compaction pile

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、強い地震動により構造物が直接的に被害が生じた他に、埋立地や臨海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構造物基礎部における被害発生および基礎部破損に伴う構造物の傾斜などの被害が見られた¹⁾。構造物に関しては、耐震設計基準の改訂や既存構造物に対する耐震補強や減衰を付加した制振(震)構法および免震構法などの設計法が確立されつつある。しかし、軟弱地盤における杭基礎構造については、地盤の振動特性が強震時の地盤剛性の変化に伴い変動することから、杭基礎側が受ける影響も複雑なものとなる。さらに、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、片方あるいは両方が被災する可能性もあり、地盤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づ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(締固め加振時間)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相混合体理論に基づき、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、

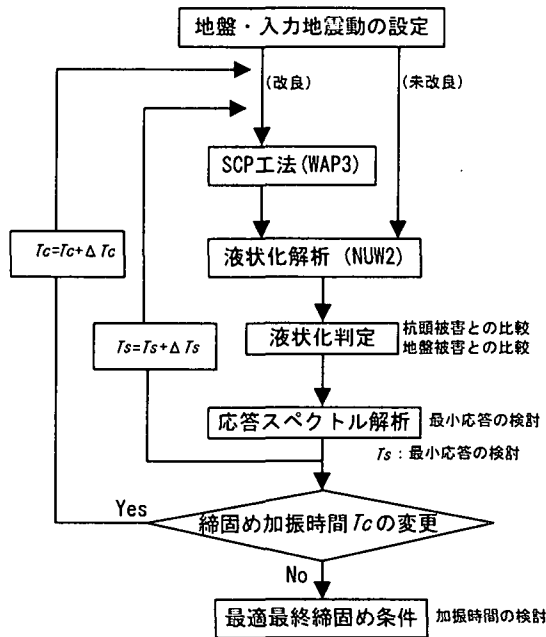


図-1 提案する耐震設計の流れ

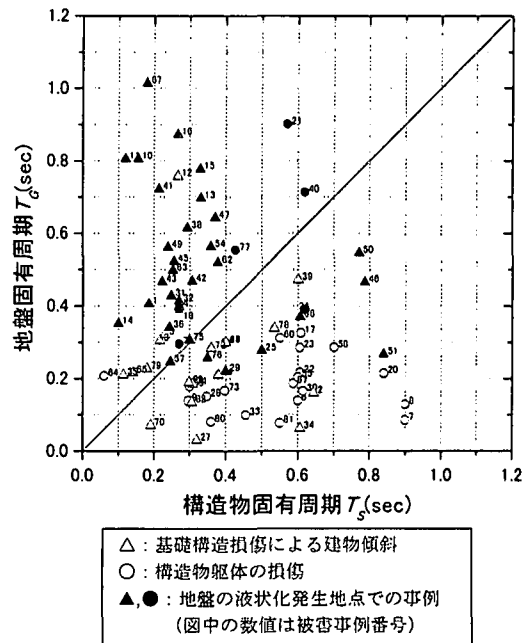


図-2 杭基礎の被害分布⁷⁾

	No. 1	No. 42	No. 18	No. 11	No. 13
柱状図					
基礎仕様	PC杭, φ=0.4m 杭長L=15m, 杭本数n=95本	AC杭, φ=0.35m 杭長L=20m, 杭本数n=37本	鋼管杭, φ=0.6m 杭長L=40m, 杭本数n=210本	AC杭, φ=0.5m 杭長L=35m, 杭本数n=10本	AC杭, φ=0.6m 杭長L=33m, 杭本数n=46本
主要仕様	732m ²	184m ²	5200m ²	147m ²	375m ²
地盤状況	護岸まで約10m, 埋立地	護岸まで約250m, 埋立地	海岸から約25m, 埋立地	海岸から約300m, 埋立地	海岸から約300m, 埋立地
上部構造	建物傾斜, 水平移動	中破, 不同沈下, 建物傾斜(1/68) 水平移動(0.4m)	大破, 全体・不同沈下 傾斜(1/30), 水平移動	中破未測	中破未測, 不同沈下 建物傾斜(1/70~75)
基礎構造	杭頭破壊, 杭の傾斜 基礎からの抜出し	杭頭破壊	杭の曲げ変形(1/10)	杭頭部で0.4m変位 GL-9m, -17m付近に破壊	杭頭部圧壊, 引張り亀裂
周辺地盤	側方流動, 液状化, 地盤沈下	側方流動, 液状化, 地盤沈下, 噴砂	液状化, 沈下, 側方流動(1.2m)	液状化, 沈下, 噴砂	液状化, 側方流動 北側岸壁, 破壊

図-3 対象とした被害事例

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_G 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 による締めめ加振時間 T_C による地盤剛性の変化したがって地盤の応答を反映することから、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. 被害事例に対する地震応答解析概要

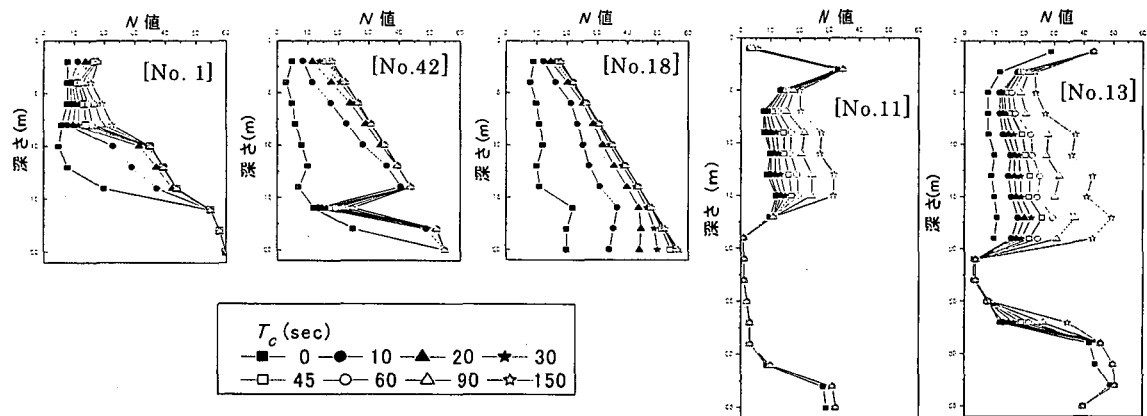


図-4 SCP 締固めによる N 値の変化

(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⁶⁾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_c 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、地層構成の異なる被害事例からNo.1, No.42, No.18, No.11およびNo.13の5事例とした(図-3参照)。それぞれ杭種はPC杭, AC杭および鋼管杭となっている。また、前半の3例が杭の支持層深さが20m程度で、後半の2例が35m程度となっている。支持層が深い事例は、表層に15~20mの埋土層を持ち、それ以深に緩い粘性土層を挟み支持層がある地層構成となっている。No.18については、20m以深の土質柱状図が不明であるため、ここでは、深さ20mの位置を支持層としている。

対象とした事例の被害については、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、その被害程度も中破未満から大破となっている。また、周辺地盤では、液状化あるいは側方流動が発生している。

(2) 解析概要

解析モデルとして、地盤は、水平方向4m、鉛直方向2mの2相非線形有限要素に分割して、水平方向24m、鉛直方向は被害事例に応じて20m~36mとした領域を対象とする。なお、解析モデルの側方を吸収境界⁸⁾とし、基盤面を剛体としている。液状化解析に用いる地盤定数は、文献9)を参考にした。また、地震応答解析に用いる入力地震波として、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 $5.4\text{m/s}^2 (=540\text{gal})$ として基盤面に鉛直下方から入力する。

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。

4. SCP工法による地盤改良効果

(1) N値分布および変位分布

本研究で対象とした地盤におけるサンドコンパクションパイル(SCP)工法による地盤改良後のN値の深さ方向分布を図-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。杭の支持層が浅く、主に砂質土で構成されているNo.1およびNo.18では、加振時間を増すに従いN値が増加しており、SCP工法による締固め効果が現れていることが確認できる。一方、深さ16m付近の薄い粘土層があるNo.42では、その粘土層の部分で締固められていないが、その他の部分では締固め効果が現れている。また、表層の埋土層の下に緩い粘土層を持つNo.11およびNo.13に関しては、表層の埋土層では、加振時間 T_c の増加に伴い、N値も増加しているが、その下の粘土層においては、締固め効果が現れていない

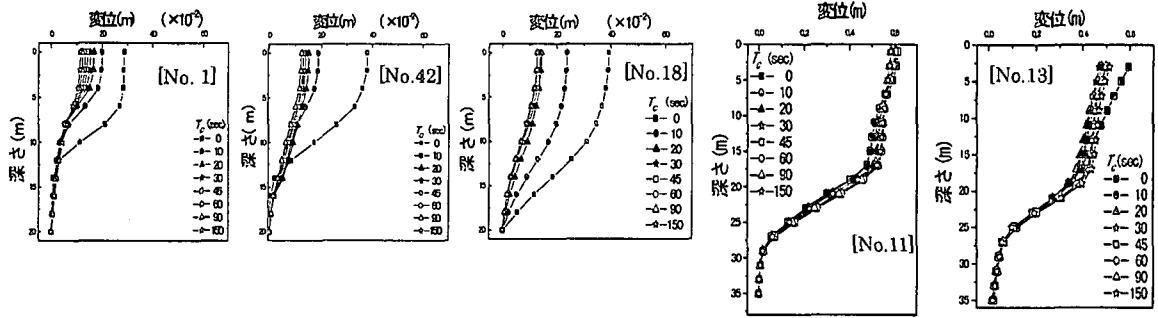


図-5 地盤の最大水平変位分布

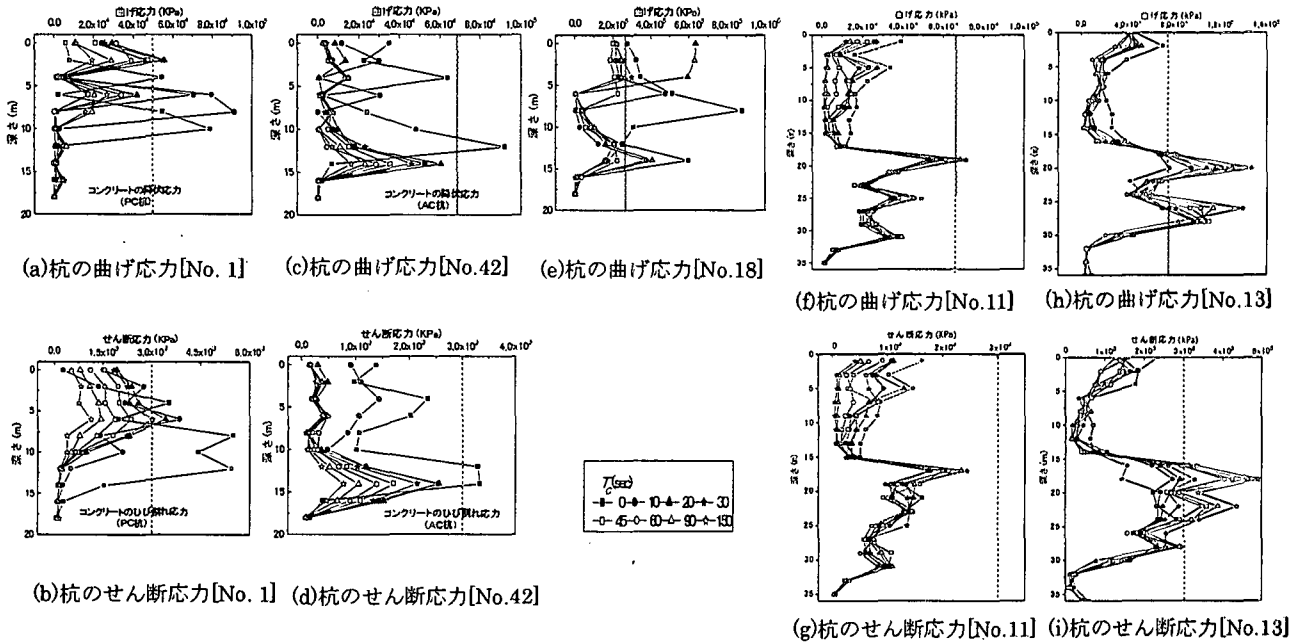


図-6 杭の最大応力

ことが分かる。

次に、地震応答解析結果に基づく地盤の最大応答変位分布を図-5に示す。杭の支持層の浅いNo.1, No.42 およびNo.18は、地盤未改良時($T_c=0$ sec)には、地表面で最大0.3~0.4m程度あった変位が、SCPを施すことにより、0.1~0.15m程度まで抑制されていることが分かる。また、地盤未改良の場合には、地層境界で変位の変化(ひずみ)が大きいものの、地盤を改良した場合には、その傾向も小さくなっている。

緩い粘土層を挟んだ地層構成となっているNo.11およびNo.13は、地盤未改良とSCPによる地盤改良後の地表面の変位に大きな変化がないことが分かり、深さ方向の変位分布も、粘土層境界で急変の状況は変わらず、その変位分布形状が保たれていると分かる。

(2) 杭基礎の応力に関する検討

地震応答解析結果による杭基礎に発生する曲げ応

力・せん断応力について検討する。図-6に各事例における杭基礎の最大応力を示す。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-6から、支持層の浅い事例(No.1, No.42, No.18)に関しては、SCPの加振時間 T_c に応じて、杭の応力が減少していることが確認できるが、事例No.11とNo.13については、表層の埋土層と粘土層の境界付近に、過大な曲げ応力が発生している。これは、粘土層より上部では、SCPによる地盤の締固め効果により、杭自体が拘束され、粘土層では、その効果が及ばずに杭の変形が許容されることにより発生していると考えられる。このように、粘土あるいは高細粒分含有率の土の層が厚い場合には、SPC工法による地盤改良が杭の応力低減に寄与しないことが分かる。

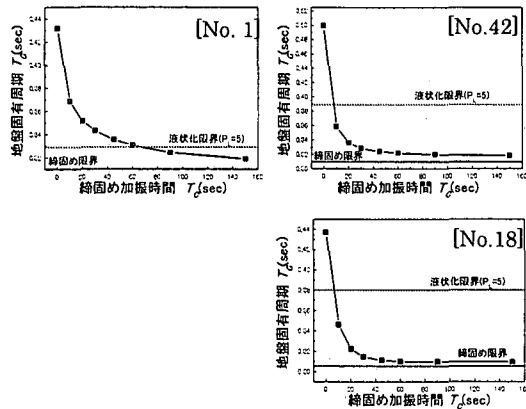


図-7 締固め加振時間 T_c と地盤固有周期 T_G の関係

ここでは、SCP 工法による締固め効果が得られた被害事例 No.1, No.42 および No.18 を対象に、杭が破壊しないような最小の締固め加振時間 T_c の検討を行う。図-6 より、被害事例 No.1 の場合は、 $T_c=45\text{sec}$ で、杭の曲げ・せん断応力を許容値以下に低減することが分かる。同様に No.42 では、 $T_c=10\text{sec}$ 、No.18 については、 $T_c=45\text{sec}$ がそれぞれ最小の締固め加振時間となる。

また、対象とした被害事例の地盤の液状化限界を液状化指数 $P_L=5$ とした場合、締固め加振時間 T_c と地盤の固有周期 T_G との関係を図-7 に示す。図中には、各地盤の最小間隙比に対応する締固め限界も示している。図-7 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。

5. 応答スペクトルによる杭基礎—構造物系の耐震設計

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-8 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。

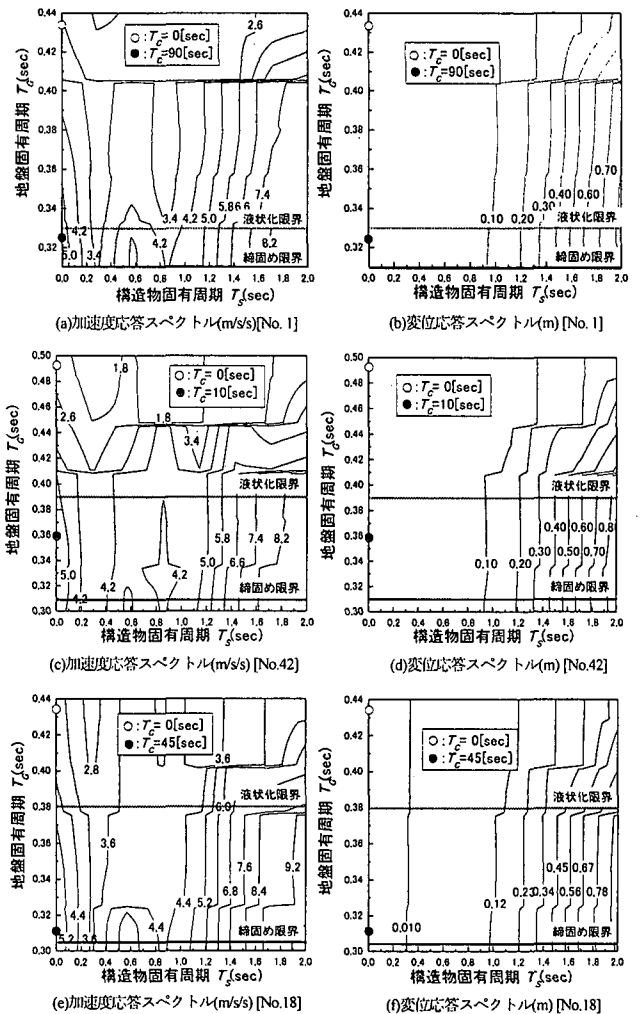


図-8 地盤固有周期 T_G と構造物固有周期 T_S による
応答スペクトル

(1) 被害事例 No. 1 の検討結果

前章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 $T_c=45\text{sec}$ ($T_G \leq 0.336\text{sec}$) 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。

(2) 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、杭基礎の破壊防止となる地盤固有周期の範囲は $T_c=10\text{sec}$ ($T_G \leq 0.359\text{sec}$) で、最適締固め時間は $T_c=10\text{sec}$ となる。

(3) 被害事例 No. 18 の検討結果

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締固め条件は、 $T_c=45\text{sec}(T_G \leq 0.311\text{sec})$ となり、杭基礎の破壊防止における $T_c=45\text{sec}$ が最適な締固め条件となる。

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。

6. 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。

また、厚い粘土層を挟む地盤では、SCP工法による締固めが困難となり、地層境界付近で杭の曲げ応力が集中し、本提案する手法では設計が不可能となることを確認した。今後更なる検討を加える予定である。

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, 建築編-4(木造建築物/建築基礎構造), 社団法人日本建築学会, 1998.
- 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) Akiyoshi, T., *et al.*, Absorbing boundary conditions for fluid-saturated porous media, *Int. J. Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.13, No.6 pp.387-397, 1994.
- 9) 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, 港湾技研資料, No.869, 1997.

AN ASEISMIC DESIGN METHOD FOR PILE FOUNDATION-SUPERSTRUCTURE SYSTEMS BASED ON SOIL IMPROVEMENT

Takashi AKIYOSHI, Kunihiko FUCHIDA, Hidetoshi MATSUMOTO
and Shozo SHIRINASHIHAMA

This paper presents an aseismic design method for pile foundation-superstructure systems based on soil improvement which depresses liquefaction and pile failures within the allowable limit for the 1995 Hyogo-ken nanbu earthquake. Soil is improved by the sand compaction method (Program: WAP3) and analyzed on liquefaction by 2D FE effective stress analysis method (NUW2), including piles as beam elements. Response spectra of a single degree of freedom system resting on the ground surface and supported by piles are drawn in terms of natural periods of the structure and the ground. Results of numerical computation show that soil improvement by SCP reduces pile stress under allowable limit for sandy grounds.