

軟弱地盤における免震基礎の効果について

秋吉 卓¹・淵田邦彦²・尻無濱昭三³

¹熊本大学工学部教授 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

E-mail:akiyoshi@kumamoto-u.ac.jp

²八代工業高等専門学校教授 (〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627)

E-mail:fuchida@as.yatsushiro-nct.ac.jp

³鉄建建設(株)技術研究所 (〒124-0014 東京都葛飾区東四つ木2-14-11 鉄筋クラブ619)

E-mail:shozo-shirinashihama@tekken.co.jp

上部構造物は免震基礎の適度な設計(低固有周期化)で耐えられるが、軟弱な地盤においては、杭基礎の大変形による破壊が生じやすい。そのため、本研究では、サンドコンパクションパイル(SCP)工法により地盤を締固めて杭応力を許容値内に納め、その上で免震基礎を最適に設計する複合的な設計について検討しようとしている。解析では、地盤、免震基礎、上部構造の3者の固有周期をキーパラメータとした応答スペクトル図から検討するが、粘土層の分布の仕方によってはSCPでは困難をきたすこともあることが分かった。

Key Words :Base isolation, soft ground, natural periods, response spectra, piles

1. はじめに

免震装置は、1995年兵庫県南部地震(以降、兵庫県南部地震と呼ぶ。)においてその効果が観測されたこともあって、その後急速に普及しつつある。しかしながら、基礎免震装置は地震入力に対して大変形することによって履歴減衰によるエネルギー消費の効率を求めるものであるから、支持地盤が軟弱なとき(例えば液状化するとき)は、装置への入力エネルギーの低下により、十分な免震効果が発揮できるかどうかはこれまでそれほど明らかにはなっていない。そこで本研究では、地盤改良で杭の破壊を防ぎながら免震基礎を設計する手法について検討する。

2. 解析手法について

(1) 解析上の仮定

解析の対象とする系のモデルは、図-1のようであるが、次のような仮定のもとに数値解析を行う。

- 地盤改良については、サンドコンパクションパイル(SCP)工法の打設締固めをシミュレートするプログラムWAP3¹⁾を用いる。
- 杭基礎をはり要素として地盤の2次元有効応力解析プログラムNUW2²⁾の中に取り込む。
- 免震基礎を含めた上部構造物は、下部とは連成しないものとする。
- したがって、基礎入力に対する地表面応答を上

部構造物への入力とする。このとき、入力としては、兵庫県南部地震(神戸ポートアイランド、GL-32m、加速度波形NS成分)を用いる。

(2) 免震基礎・杭・地盤のモデル化

免震基礎には、LRB(Lead Rubber Bearing)を用い、その復元力特性は完全塑性型バイリニアモデルで表現されるものとする。以後のキーパラメータとなる

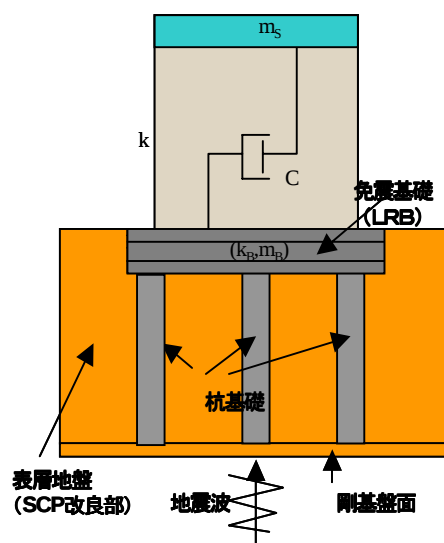
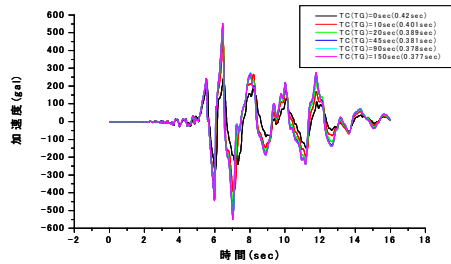
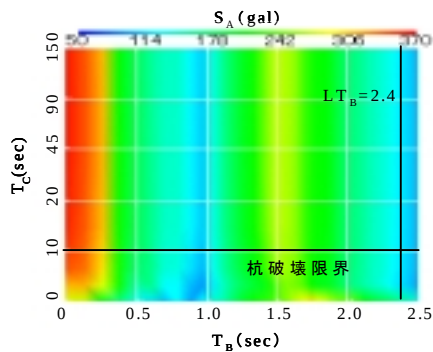


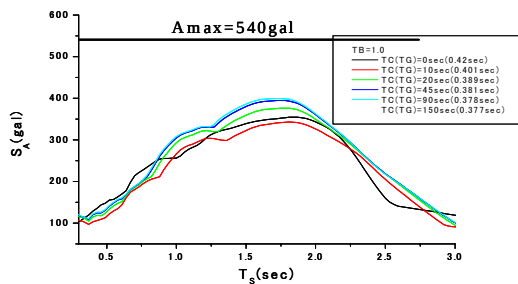
図-1 モデル図



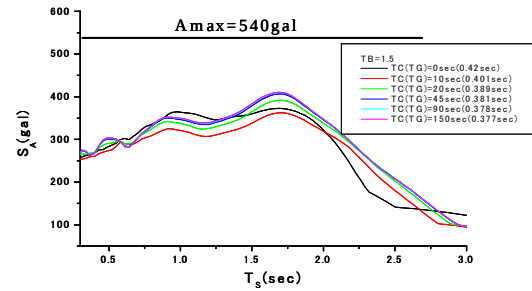
a) 入力波（地表面加速度）



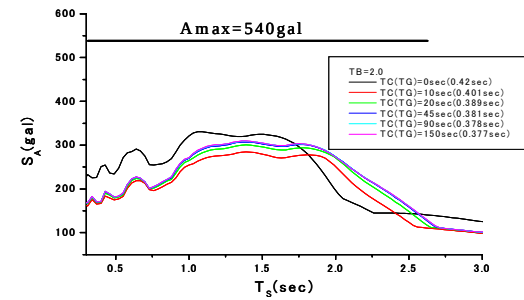
b) T_B, T_C による S_A のコンター



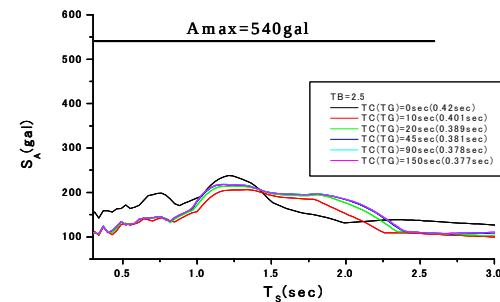
c) $T_B=1.0\text{sec}$



d) $T_B=1.5\text{sec}$



e) $T_B=2.0\text{sec}$



f) $T_B=2.5\text{sec}$

図-2 入力（地表面）加速度・構造物頂部の加速度応答スペクトル S_A （地盤：Case31）

免震建物周期 $T_b [=2\pi\sqrt{(m_s+m_b)/k_b}]$ および免震周期 $T_B [=2\pi\sqrt{m_b/k_b}]$ は、免震層概略設計例³⁾を参考に決めている。

杭は正方形配置で、2.(1) b)のようにモデル化する。地盤モデルは、兵庫県南部地震における被害事例^{4), 5)}から抜粋したもので、それぞれ整理番号Case1, 10, 13, 31および49の5ケースを採用している。それぞれの土質やN値などのデータを抜粋し、解析に必要なデータを作成して、液状化の判定は岩崎らの方法⁶⁾によっている。

3. 解析結果と考察

(1) SCP締固め加振時間と免振周期及び構造物固有周期と加速度応答スペクトルとの関係

図-2は、地盤データCase31における構造物頂部の加速度応答スペクトル S_A である。1ステージ当たりの締固め加振時間 T_C または地盤の固有周期 $T_G [= \Sigma$

$4H_i/V_i]$ と期 T_B を軸としたb)のコンター図及びc)~f)ではその中での代表的な T_B での構造物固有周期 $T_s [=2\pi\sqrt{m_g/k_s}]$ ごとの S_A を示している。

図b)より、杭の破壊は、 $T_C > 10\text{sec}$ ならば防止できる。さらにコンター図より S_A を見ると、 T_C が大きくなるにつれて S_A の値も若干ではあるが大きくなっている。これは締固めで地盤剛性が上がって、上部構造物へ伝わる力が大きくなったためであると考えられる。 S_A の値は、 $T_C = 0\text{sec}$ （原地盤）では T_B が 0.8sec で最小であるのに対して、締固めを施した地盤では $T_B = 1.0\text{sec}$ 弱が最小となっている。つまり、締固めで地盤剛性が上がったことによって、最適免震周期が若干ではあるが長周期側にシフトしている。

(2) 地盤の変位、杭の曲げ応力

軟弱地盤では、液状化や側方流動による地盤の過大変形による杭への悪影響が懸念されるため、ここでは、地盤や杭の変形に注目する。

図-3は、上から地盤のCase1, 10, 13, 31および49における曲げ応力（左図）最大水平変位（右図）を表しており、左図中の縦線は長期許容応力 σ_a を示している。また、色の違いは締固め加振時間 T_C ごとによる変化を表現している。これより、 $T_C=0\text{sec}$ の原地盤では、Case49を除いて、地表面近くでの地盤変位が大きくなっていることがわかる。Case49で変位の差があまりないのは、粘土層で変位が低減できていないことが推定される。しかし、SCPによる地盤改良で T_C を増していくと、おおむね杭にかかる曲げ応力を低減し、杭破壊を防いでいることが見られる。しかし、Case13のように、粘土層が中間に厚く堆積している場合は、SCPによる地盤改良は効果が薄く、杭破壊は防げないことが示されている。

4. まとめ

軟弱地盤における基礎免震装置の効果を、サンドコンパクションパイル(SCP)工法による地盤改良によって上げうるかどうかについて、さまざまなパラメータによる検討を進めてきたが、その結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 免震周期の長周期化は、応答加速度の低減には有効であるが、変位の制約のため無制限ではない。したがって、軟弱地盤では地盤固有周期と免震周期との差を大きくする必要があるため、締固め等の地盤改良は有効となる。
- (2) SCP締固め加振による地盤改良は、上部構造の応答加速度低減には効果が小さいが、砂質系地盤での杭の破壊防止のための応答変位縮小に大きな役割を果たす。
- (3) SCP締固めによって、加速度応答スペクトルの最小値がシフトするので、これに合わせて最適免震周期を決定する必要がある。
- (4) 免震基礎部の地震エネルギー吸収は、地盤の固有周期—免震周期，免震周期—上部構造物の固有周期の差が大きいときに効果が大きくなる。

参考文献

- 1) 秋吉 卓 他4名：サンドコンパクションパイル工法による地盤剛性改良の動的評価について，土木構造・材料論文集，第8号，pp. 51-60, 1992.
- 2) Akiyoshi T. et al: Liquefaction analysis of sandy ground improved by sand compaction pile, *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.12, No.5, pp.299-307, 1993.
- 3) 免震構造設計指針，日本建築学会，丸善，2001.
- 4) 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.
- 5) 妹尾志郎ほか：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.
- 6) 岩崎敏男ほか：地震時における砂質地盤の液状化判定

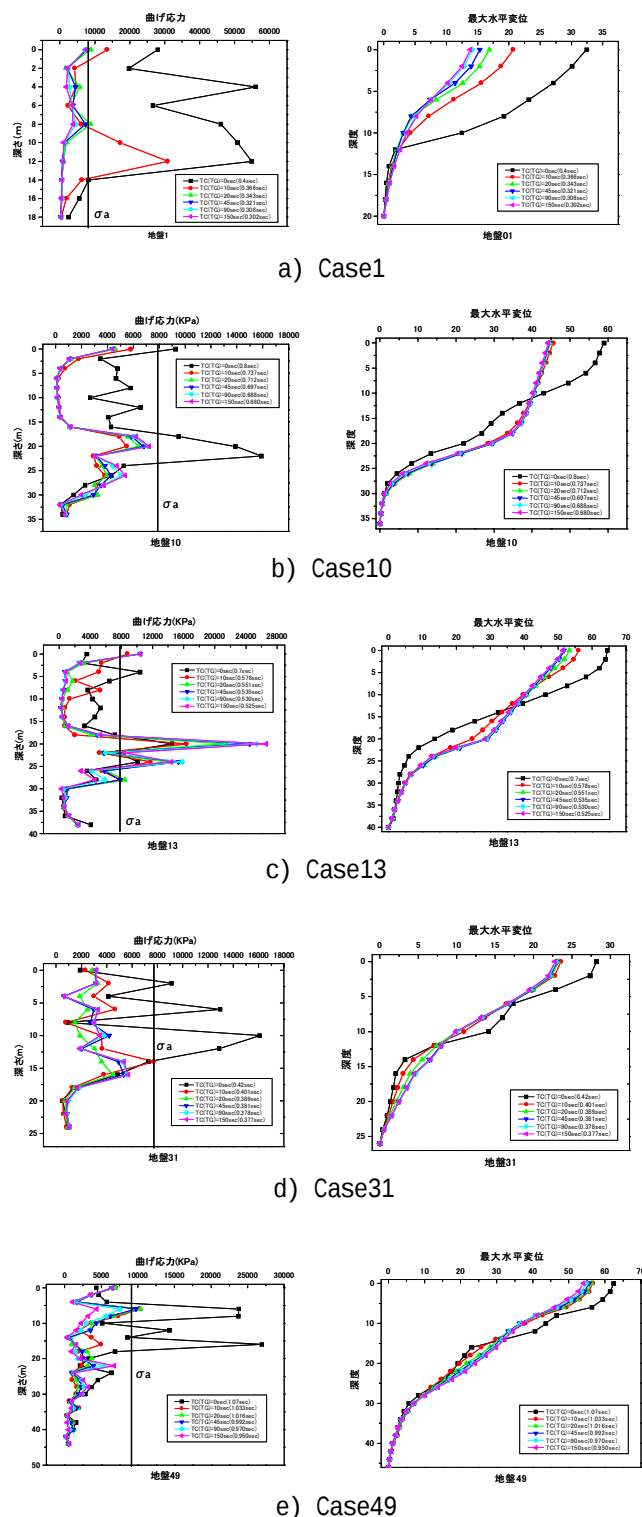


図-3 杭の最大曲げ応力及び地盤の最大水平変位

法と耐震設計への適用に関する研究，土木研究所資料，第1729号，pp.99-108，1891.

(2003. 5. 24 受付)

ON THE EFFICIENCY OF BASE ISOLATION SYSTEMS IN SOFT GROUND

Takashi AKIYOSHI, Kunihiko FUCHIDA and Shozo SHIRINASHIHAMA

Base isolation systems have shown extremal lowering of structural response acceleration with the long natural period. However the efficiency for large displacement of soft ground due to liquefaction has not been made clear. This study aims to present the optimal design method for base isolated structures in soft ground without the failure of piles by practicing the sand compaction pile (SCP) method. In the analysis, natural periods of ground, base isolation system and upper structures are used as key parameters for the response spectra. Result shows that thickness and depth of clay layers governs the aseismic design of base isolated structures based on SCP ground improvement.