

地盤－杭基礎系における液状化特性を 反映した応答スペクトル

秋吉 卓¹・湊田邦彦²・尻無濱昭三³・植田正樹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 2-39-1)

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 工修 鉄建建設(株) 技術研究所 (〒286-0825 成田市新泉 9-1)

⁴ 学生会員 八代工業高等専門学校専攻科 環境建設工学専攻 (〒866-8501 八代市平山新町 2627)

地表面上の構造物の応答スペクトル評価において、地盤－杭基礎系の液状化も含めた地震応答特性を考慮する方法を提案するとともに、液状化防止のための振動締固めによる地盤改良を行った場合に、それらが地上構造物の応答スペクトルに及ぼす影響について検討した。表層地盤の地震応答解析は著者らが開発した2次元有効応力解析プログラム NUW2 により実施した。異なる地盤改良条件によるモデル地盤ごとに応答スペクトルを算定し、これらを各改良地盤の平均固有周期と構造物の固有周期の2軸に対してコンター表示することによって、耐震設計のための両固有周期を設定する手法についても提案した。さらに液状化の可能性のある軟弱地盤においては設定される地盤の固有周期に対して地盤改良条件を対応させることも可能なことを示した。

Key Words : response spectra, soil-pile system, liquefaction, effective stress analysis, ground improvement

1. まえがき

地震時に軟弱な表層地盤で生じる液状化は地表付近や地表面上の構造物に大きく影響することから、このような地盤上に構築される構造物の地震応答を適切に評価するには、液状化を含めた周辺地盤の地震応答特性を把握することが重要である。また液状化に対して地盤改良などの対策工法が数多く考案されているが、実地震による検証例は少なく、適切な評価法が確立されるまでには至っていない。一方、都市直下で起こる地震に対して、震源特性などを含めた地上構造物の応答スペクトルに関する研究も行われているが¹⁾、表層地盤の動特性、特に液状化対策のための地盤改良などを反映させた構造物の応答スペクトルを検討した例は少ない。

そこで本研究では、振動締固めによる地盤改良を実施する場合も含め、杭基礎を有する表層地盤の地震応答特性に関して、有効応力解析に基いた地表面

上構造物の応答スペクトルを算定し、表層地盤と上部構造物の両固有周期に対して評価し、検討する。

2. 表層地盤の地震応答解析手法の概要

Fig.1 は、解析の対象とする、杭基礎を有する軟弱な表層地盤と地表面上の1自由度系(水平振動のみ)構造物の模式図である。ここでは既存の2次元有限要素法による有効応力解析プログラム「NUW2」²⁾を用いて軟弱な表層地盤の地震応答解析を行う。この解析プログラムは、Biot の2相混合体理論を基に、井合らの構成式³⁾を組み込んだものである。また著者らが開発した、振動締固めによる地盤改良工法のシミュレーション手法⁴⁾を用いて、改良地盤に対する応答解析も実施し、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。ここでは表層地盤の平均固有周期 T_0 と1自由度系構造物の固

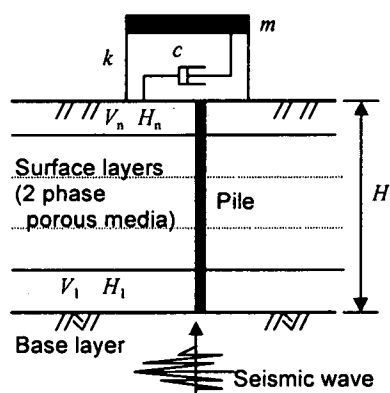


Fig.1 Surface ground layers and SDOF structure

Table 1 Construction conditions of SCP method

Term	Conditions	
Array	Rectangular	
Pile space (m)	3.0	
Compacting force (kN)	600	
Radius of pile (m)	0.4	
Vibrating frequency (Hz)	9.3	
Compacting time par 1 stage (sec)	SCP1	30
	SCP2	60
	SCP3	90
	SCP4	120
	SCP5	150

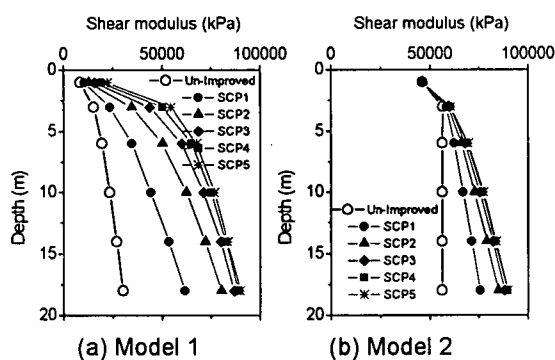


Fig.2 Distribution of shear modulus of surface layers

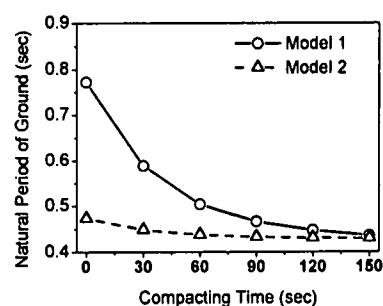


Fig.3 Relation between natural period of ground layers and compacting time

有周期 T_s とをキーパラメータとして、それら 2 軸の空間応答スペクトル面を表わし、応答を小さくする固有周期の組み合わせの選択に便利ように、これを平面上にコンター表示する。これより地盤改良を反映した地盤の固有周期と応答スペクトルとの関係について検討する。

表層地盤の固有周期 T_G については、各層のせん断波速度 ($V_1, V_2, \dots, V_n$) 及び厚さ ($H_1, H_2, \dots, H_n$) を用いて、次式より算定する。

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n (H_i / V_i) \quad (1)$$

3. 数値計算結果と考察

(1)地盤モデルと諸量

解析の対象とした表層地盤モデルは、Fig.2 に示すように、せん断剛性の鉛直分布が異なる 2 種類の地盤とし、どちらも基盤層の上にこれより軟らかい砂質性の表層が載っている地盤構造で、表層地盤の厚さ $H=20\text{m}$ とし、表層地盤は 20 層及び四辺形要素に分割し解析に用いた。杭基礎は直径 0.4m のコンクリート杭でヤング係数を $1.5 \times 10^5 \text{kPa}$ とした。また表層

地盤は地表面下 3m まで飽和しているものとし、密度 1900 kg/m^3 、透水係数 $1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 及び細粒分含有率 10% とした。○印は無対策地盤の剛性分布であり、その他の記号は液状化対策として、SCP の施工条件の中から、ケーシングパイプ引き上げ時の各ステージごとの締固め加振時間をパラメータとする Table 1 の SCP1～SCP5 の地盤改良を行った場合のせん断剛性の分布を示している。無対策地盤に対して SCP による締固め加振時間が増す場合ほど、表層のせん断波速度がその剛性改良により増加し、表層の平均的な固有周期は短周期化されていくが、その様子を図化したものが Fig.3 である。締固め加振時間 90 秒以上の場合には解析の結果、過剰間隙水圧の上昇はなく液状化がほぼ抑制されている。ここでは以上の無対策及び改良後の各地盤モデルに対して解析を実施する。

入力地震動として、千葉県東方沖地震（東大生研千葉実験所記 NS 成分(1987)）の波形を主として用い、基盤において震度 5 強程度の地震動レベルを想定して最大加速度を 250gal に調整し、それらの主要動部分の 20 秒間について解析を行った。地震波は、基盤層の底部を固定境界として、これに鉛直下方から入

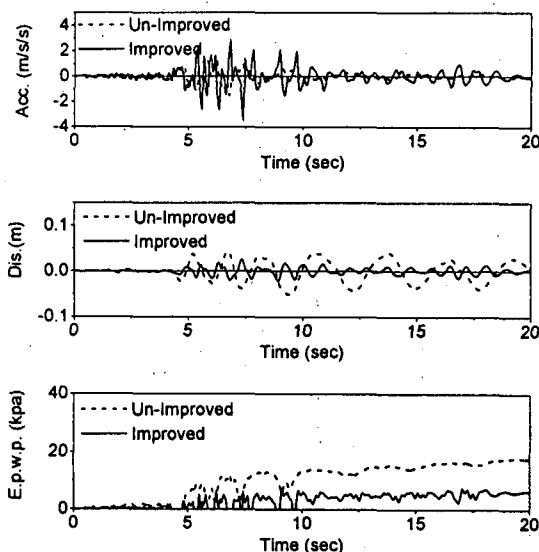


Fig.4 Responses of acceleration, displacement at the ground surface and pore water pressure at GL-8m

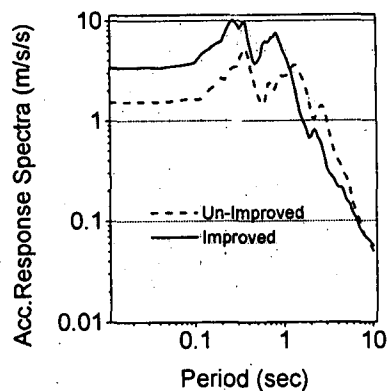
射するものとし、ここでは水平なせん断振動についてのみ検討した。

(2)表層地盤の地震応答解析結果

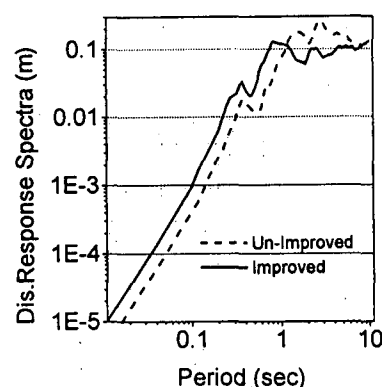
Fig.4は、無対策地盤と締め固め加振時間150秒のSCP改良地盤（：SCP5）における、地表面での加速度・変位応答、地表面から深さ8m位置における過剰間隙水圧の時刻歴を示したものであり、両図中の破線は無対策地盤の応答を、実線は地盤改良を施した場合の応答を示している。Fig.4に破線で示す無対策地盤では、過剰間隙水圧は10秒以降ほぼ完全液状化に至っており、地表面における加速度応答は入力地震動の加速度最大値よりも小さくなっている。実線の地盤改良を行った場合は、無対策地盤に比べて加速度応答は大きくなるものの、過剰間隙水圧が減少して液状化は発生しないため変位応答も抑制されることがわかる。

(3)1自由度系構造物の応答スペクトル

Fig.4の地表面における加速度応答を入力とする1自由度系構造物の応答スペクトルを図示したものがFig.5であり、(a),(b)はそれぞれ加速度及び変位の応答スペクトルで、破線は無対策地盤上の構造物の応答スペクトルを、実線は改良地盤上のそれを示している。地盤改良によって地表面の加速度応答が増幅するため、特に短周期構造物の加速度応答が無対策地盤の応答よりも大きくなり、約1秒以上の長周期構造物の応答は、加速度・変位ともに、無対策地盤



(a) Acceleration



(b) Displacement

Fig.5 Response spectra of acceleration and displacement for Chiba-ken toho-oki earthquake

のそれらと同程度になることがわかる。

(4)地盤の動特性を考慮した応答スペクトル

次に、Fig.6は、地盤の平均固有周期と構造物の固有周期を2軸として、これらに直交する方向に変位応答スペクトルの軸をとってこれを3次元表示したものであり、に対する結果を示している。この図より、地盤及び構造物の固有周期に対する最大応答値の分布特性を読み取ることができる。さらに、Fig.7はFig.6の地盤と構造物の固有周期を2軸として応答スペクトルを等高線表示したものであり、Fig.7より、2つの固有周期に対する構造物の応答の分布特性が読み取りやすくなっている。

そこで地震波として、千葉県東方沖地震に加えて、兵庫県南部地震のポートアイランドの記録波(1995)、El Centro 記録波(1940)、十勝沖地震(1968)の八戸での記録及び鹿児島県北西部での地震記録(1997)の5つの地震波に対して応答スペクトルを求め、それらを

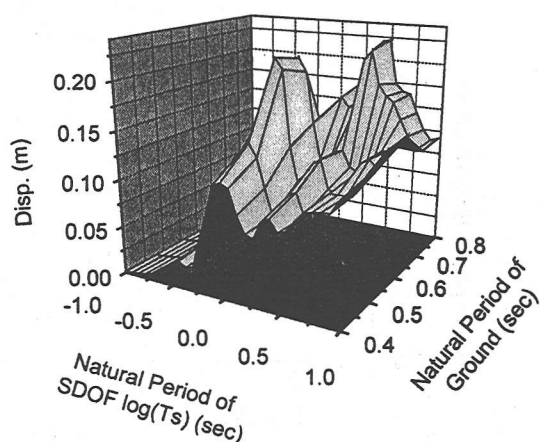


Fig.6 Response spectra for Chiba-ken toho-oki Earthquake (3D-indication)

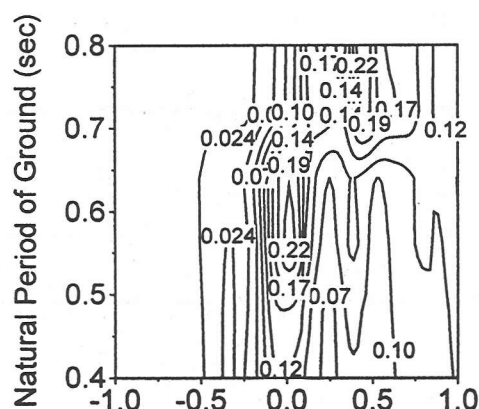


Fig.7 Response spectra for Chiba-ken toho-oki earthquake (Contour-indication)

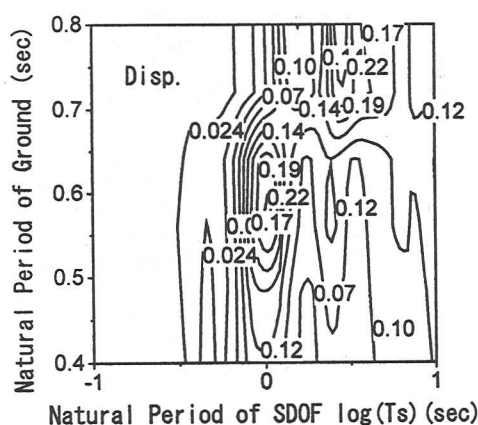


Fig.8 Averaged response spectra (Model1)

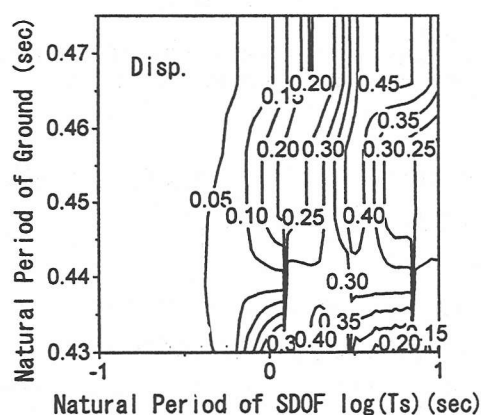


Fig.9 Averaged response spectra (Model2)

単純に平均して Fig.7 と同様に表したものが Fig.8, 9 であり、それぞれ Model1,2 の平均化した応答スペクトルを表わしている。Fig.8, 9 より、地上構造物の応答量のあるレベル以下にするための、地盤と構造物の固有周期 (T_G , T_S) の組み合わせを容易に決定できることから、これらの図は、地盤と構造物の動特性を考慮した耐震設計への応用も可能と考えられる。また地盤の固有周期 T_G は Fig.3 のように SCP の締固め加振条件と関連しているので、液状化を防止するための地盤改良の施工条件を選択することへの応用も可能であろう。

4. まとめ

本研究は、軟弱な表層地盤の液状化を含めた動特性を考慮した地上構造物の応答評価を目的として、表層地盤の地盤改良が地上構造物の応答スペクトルに及ぼす効果まで含めて検討したものであり、表層地盤及び構造物の固有周期を用いて地上構造物の応

答を管理する方法を提案した。ここで提案する応答スペクトルは、表層地盤の液状化特性を反映させたものであり、液状化防止のための地盤改良条件を設計することに応用できることを示した。

参考文献

- 1) 佐藤ほか：兵庫県南部地震における強震域での加速度応答スペクトルの推定、土木学会論文集、No.563/I-39、pp.149~159、1997。
- 2) Akiyoshi, T., Fuchida, K., Matsumoto, H., Hyodo, T. and Fang, H.L., Liquefaction analysis of sandy ground improved by sand compaction piles, Int. J. Soil Dyn. and Earthq. Eng., Vol.12, No.5, pp.299-307, 1993.
- 3) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T., Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, JSSMFE, Vol.32, No.2, pp.1-15, 199
- 4) Akiyoshi, T., Fuchida, K., Matsumoto, H., Hyodo, T. and Ueda, T., Simulation of sand compaction pile method, Proc. of 9th Japan Earthq. Eng. Symp., pp.949-954, 1994.