

液状化を考慮した応答スペクトル

○今中康貴¹・秋吉 卓²・孫 遜³・淵田邦彦⁴・尻無濱昭三⁵

¹ 学生員 熊本大学大学院 工学研究科土木環境工学専攻 (〒860 熊本市黒髪2丁目39-1)

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

³ 工修 熊本大学大学院 自然科学研究科環境科学専攻 (〒860 熊本市黒髪2丁目39-1)

⁴ 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 八代市平山新町2773)

⁵ 正会員 工修 鉄建建設株式会社 エンジニアリング本部 (〒286 千葉県成田市新泉9-1)

地表面上の構造物の応答スペクトルを評価する際に、液状化を含めた周辺地盤の地震応答特性をも考慮する手法を提案するものである。応答スペクトルは地盤の固有周期と構造物の固有周期の2変数関数となり、スペクトルのコンター表示から耐震設計用の適切な2変数値を設定する手法を示した。軟弱地盤では、設定される地盤の固有周期に対して、液状化防止工法の施工条件を対応させられることも例示した。

Key Words : 応答スペクトル、液状化、固有周期、振動締め

1. はじめに

都市域の臨海部など比較的軟弱な地盤においては、液状化など地盤災害の危険性に対して何らかの地盤改良が必要となる。このような地盤上に構築される構造物の地震応答を評価するには、液状化を含めた周辺地盤の地震応答を適切に評価することが重要といえる。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といえる。そこで本研究では、地盤の振動応答特性、特に液状化対策としての地盤改良を考慮した表層地盤の動特性と、構造物の動特性との同時考慮による応答スペクトルから、応答を総合的に評価する手法を提案する。

2. 解析手法の概要

解析の対象モデルは、図-1のように軟弱な表層地盤の地表面に固着された1自由度系(水平方向のみ自由)の構造物とする。構造物の応答の評価は応答スペクトルによるが、支配パラメータとして構造物の固有

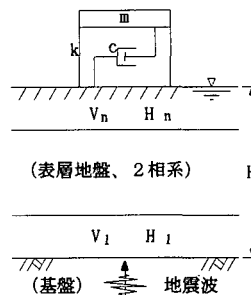


図-1 表層地盤と1自由度系構造物

周期 (T_s) と表層地盤の固有周期 (T_G) の2つを取り上げる。したがって、応答スペクトルの表示は立体的になるので、これを平面で取り扱うために応答スペクトルをコンター表示とする。ここで構造物の固有周期 T_s については、通常のように $T_s = 2\pi\sqrt{m/k}$ (m :質量、 k :ばね係数) とするが、表層地盤の固有周期 T_G についてはその初期剛性の分布 (この場合はせん断波の伝播速度 V_1, \dots, V_n) 及び層厚 H_1, \dots, H_n に対して次式を用いる。

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

なお、地盤I層の V_i を N_i (:I層のN値) と対応させるときは $V_i = 80N_i^{1/3}$ の関係を用いることとする。

表層地盤の地震応答を解析する手段として、2次元有効応力解析プログラム「NUW2」を用いる。この手法

は Biot の 2 層混合体理論に基づく方程式を基礎とし、土粒子と間隙水の混相体に関する構成式として井合らによるひずみ空間における多重せん断機構モデル³⁾を用いて、逐次積分により地震応答を求めるものである。次に液状化を防止するための地盤改良工法として、サンドコンパクションパイル工法 (以下 SCP 工法) を選定し、この改良過程をシミュレートするプログラム「WAP3」⁴⁾を用いる。ここでは、上記の「NUW2」及び「WAP3」を用いて、SCP 工法による改良地盤も含めた表層地盤の応答解析を行い、地表面応答加速度を入力と考えて、構造物の応答スペクトルを求める。

3. 解析条件

(1) 入力波の特性

本解析の入力波として、兵庫県南部地震 (1995 年 : 神戸ポートアイランド鉛直アレーで記録された NS 成分 (G. L. -32.0m) ; 以後年号省略) と、千葉県東方沖地震 (1987 年 : NS 成分 ; 以後年号省略) の最大加速度を 250 gal として用いることとする。それぞれの波形のフーリエスペクトルを図-2 に示す。兵庫県南部地震波形は長周期側に卓越周期 (1.862 sec) を持ち、一方、千葉県東方沖地震波形は短周期側に卓越周期 (0.363 sec) を持つ、典型的な 2 つの地震波を入力に用いることにする。

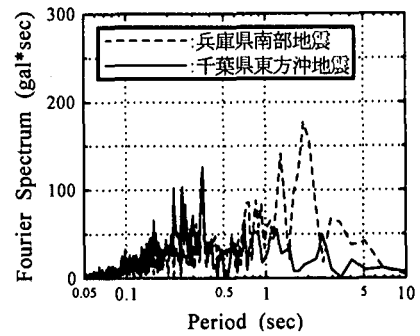


図-2 入力波のフーリエスペクトル

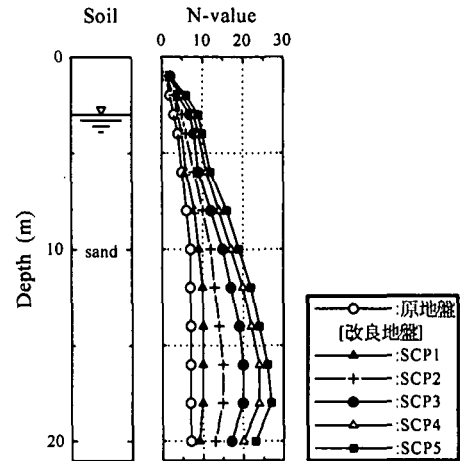


図-3 地盤モデルと SCP 改良結果

(2) 解析地盤モデル

今回解析の対象とした地盤モデルは、図-3 に示す。図中の○印がその初期剛性 (この場合初期 N 値) 分布を表しており、地下水位が G. L. -3.0m で 20m の基盤面まで N 値がなだらかに増加する砂層地盤を用いた。いくつかの SCP 施工条件のうち、今回はケーシングパイプを 1m づつ引き上げていく各ステージごとの締固め加振時間をパラメータとして SCP による改良を行ったが、その他の SCP の施工条件を含めて表-1 に示している。このとき、地盤の単位体積重量は地下水面より上が $\gamma_t = 1.7$ (tf/m³)、地下水面以下が $\gamma_t = 2.0$ (tf/m³)、さらに細粒分含有率は深さ方向一様に 10% として解析を行った。

表-1 SCP 施工条件

項目	施工条件	
配置	四角形	
杭間 (m)	3.0	
加振力 (tf)	60.4	
杭径 (m)	0.4	
加振振動数 (Hz)	9.3	
1 ステージ当りの締固め加振時間 (sec)	SCP1	30
	SCP2	60
	SCP3	90
	SCP4	120
	SCP5	150

4. 解析結果

(1) 表層地盤の地震応答解析結果

ここでは、無対策地盤と締固め加振時間が 150 sec

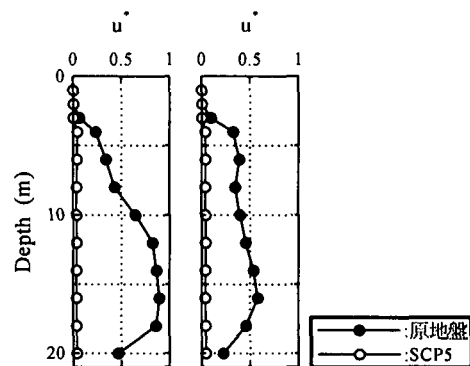


図-4 最大過剰間隙水圧比の鉛直分布

の場合の SCP 改良地盤（:SCP5）との比較を行う。図-4は最大過剰間隙水圧比 (u^*) の鉛直分布を示したものである。無対策地盤では、どちらの地震入力においても過剰間隙水圧比 (u^*) が大きくなり一部液状化が発生したと考えられるが、1ステージ当たり 150 sec 間締固める SCP による改良により過剰間隙水圧比 (u^*) がほとんど発生しなくなっていることが分かる。

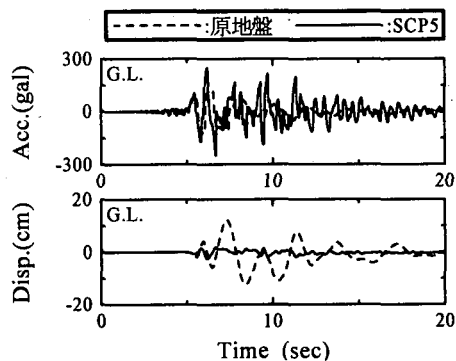
図-5に地表面における時刻歴を示すが、水平方向の加速度及び変位応答の無対策の原地盤と改良地盤（:SCP5）の最大応答値を比較すると、加速度応答では改良後の値が兵庫県南部地震波で約2倍、千葉県東方沖地震波で約1.1倍となったが、変位応答では約1/5、約1/3となった。今回の SCP5 のように-10mでN値を20にまで締固めた硬い地盤では（図-3参照）、地盤変位の抑制効果が上がる反面、加速度応答は逆に増大することもあり得ることを示している。

次に入力波の違いによる影響を見るため、無対策の原地盤の地表面水平応答加速度のフーリエスペクトルの比較をしたのが図-6である。ここでの解析対象地震では、兵庫県南部地震波で長周期成分が増え、また千葉県東方沖地震波で1sec前後の成分が急増しており、液状化によると思われる地盤剛性低下の影響が入力波の長周期化をもたらしている。

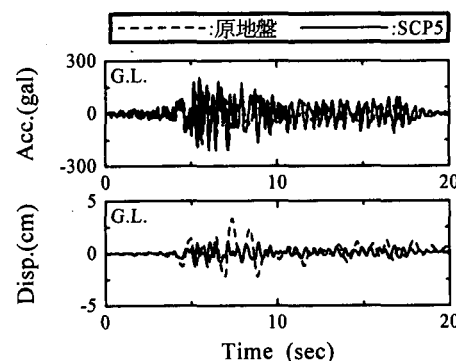
(2) 従来型の応答スペクトル

図-5 (a) における兵庫県南部地震による地表面水平加速度応答時刻歴を入力として、図-1の1自由度系（減衰定数 $h=0.05$ ）構造物の応答スペクトルを求めたものが図-7及び図-8であるが、それぞれ加速度及び変位の応答スペクトルであり、点線が原地盤で実線が SCP 改良地盤（:SCP5）である。まず加速度応答スペクトル S_A では、短周期域では改良地盤の方が大きくなっているが、構造物の固有周期 T_s が1 sec以上の長周期域では改良地盤の方が応答が抑えられている。また、変位応答スペクトル S_D も、加速度応答同様、地盤改良した結果、短周期域では大きな応答値を示すが、長周期域では小さな応答値となっている。このことから、SCPによる地盤改良により長周期構造物の応答が抑制される結果となった。

また、千葉県東方沖地震に対する1自由度系構造物の応答スペクトルもほぼ同様の傾向を示したが、ここでは省略する。



(a) 兵庫県南部地震



(b) 千葉県東方沖地震

図-5 原地盤と改良地盤の地表面時刻歴応答

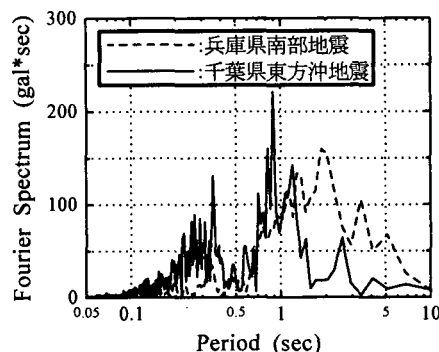


図-6 地表面応答加速度のフーリエスペクトル (原地盤)

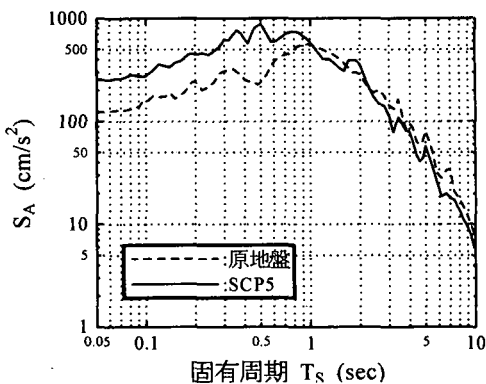


図-7 加速度応答スペクトル

(3) 地盤の動特性を考慮した応答スペクトル

ここでは、地盤の動特性を考慮した応答スペクトルの総合評価について検討する。地盤の動特性を評価するには様々な方法があるが、ここでは初期の固有周期 T_G (前出の式 (1)) を地盤の動特性の代表パラメータと見なし、応答スペクトルとの関係を調べた。最初に図-3で見ているように、原地盤から SCP による締め固め加振時間を増していくと、各層のせん断波伝播速度が改良され、地盤の固有周期 T_G も短周期化されていくが、それを図示したのが図-9である。この図中の数字は深さ方向の最大過剰間隙水圧比である。

次に応答スペクトルと地盤の固有周期 T_G ・構造物の固有周期 T_S との関係を図-10、図-11に示した。図-10は加速度応答スペクトル S_A であるが、この図より構造物の固有周期が 1 sec 以下の場合、地盤の固有周期が短い、すなわち締め固め加振時間が長くなるほど加速度応答が大きくなっていることが分かる。

また、図-11は変位応答スペクトル S_D であるが、構造物の固有周期が 1 sec 以上の場合、地盤の固有周期が小さいほど変位応答が小さくなっている。

このような2変量 T_G 、 T_S による応答スペクトルから、応答量が小さくなる (T_G 、 T_S) の組み合わせを決定できることから、構造物と地盤の両方の動特性を考慮した耐震設計にも利用できる。当然、 T_G が決まると図-9に戻り、液状化しない範囲での締め固め時間等の施工条件を設定できることになる。

5. まとめ

本研究は、表層地盤の動特性を考慮した地上構造物の応答評価を目的として、特に地盤液状化を考慮した応答スペクトルについて、液状化解析と従来の応答スペクトル解析とを単純に結合して検討したものであり、SCP 工法による地盤改良が応答スペクトルに及ぼす影響についても検討を加えた。また、地盤と構造物の固有周期による応答の管理により、適切な耐震設計を行える可能性について示した。

参考文献

- 1) 佐藤ほか, 兵庫県南部地震で発生した強震域での理論加速度応答スペクトルの推定, 第1回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, 97-98, 1996.
- 2) Akiyoshi, T., et al, "Liquefaction analyses of sandy ground improved by sand compaction piles", *Int. J. Soil Dynamics*

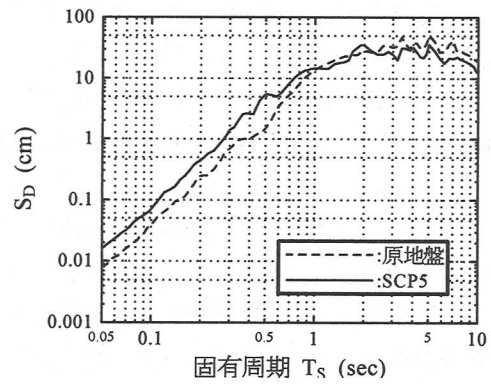


図-8 変位応答スペクトル

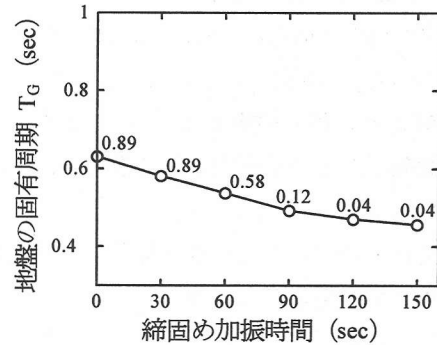


図-9 SCPによる締め固め加振時間と地盤の固有周期との関係

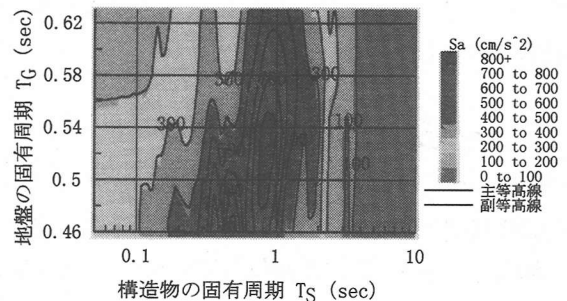


図-10 加速度応答スペクトル

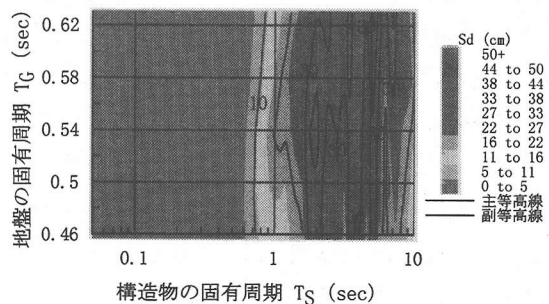


図-11 変位応答スペクトル

- and *Earthquake Engineering*, Vol.12, No.5, pp.299-307, 1993.
- 3) Iai, S. et al, *Soil and Foundations*, 32(2), 1-15, 1992 ; 33(1), 192-199, 1993 ; 33(1), 102-107, 1993.
- 4) Akiyoshi, T. et al, *Proc. 9JEES*, 949-954, 1994.