

不整形性と液状化による地盤の 局所的増幅特性への影響

秋吉 卓¹・淵田邦彦²・尻無濱昭三³・田嶋秀一⁴

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正会員 工修 鉄建建設(株) 技術研究所 (〒286-0825 千葉県成田市新泉 9-1)

⁴熊本大学大学院自然科学研究科前期課程学生 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

表層地盤の不整形性のみならず液状化が、地表面の加速度およびひずみに関する局所的増幅特性に与える影響について、実地盤モデルに対して数値解析により検討する。地盤モデルとしては、神戸の地盤断面を2次元モデルとして作成し、海側埋立地盤の液状化解析には井合らの構成式による有効応力解析プログラムを適用し、さらにモデルの山側と海側の両側方境界には当研究室で開発した吸収境界条件を付加して、山側の線形地盤のみならず海側の非線形地盤においても地震波動の透過を助けている。結果的には地表面においては、地盤の非線形性のため加速度の周波数応答関数の増幅特性が著しく低下し、成層地盤の不整形性により大加速度が集中する場所と時刻が存在し、また液状化に伴い大ひずみ地域がかなり広域にわたることを示した。

Key Words : *local site effect, irregular boundary, liquefaction, energy concentration, Kobe ground, frequency response function of ground*

1. まえがき

1995年の兵庫県南部地震では、液状化が広範囲に及び建造物に多大の被害と地盤には大きな永久変形を残した。さらにまた、非液状化地域でも、建物・施設に甚大な被害が出たが、いわゆる「震災の帯」といわれる最大被害のベルト地帯については、これは地盤特有な増幅特性のせいとも言われてきた。本論ではこれらの現象を理解するために、地盤を2相系飽和多孔質媒体として2次元有限要素法によるモデル化から非線形有効応力解析プログラムを作成し、これに吸収境界条件¹⁾を付加して、ローカル・サイト・イフェクトを検討したものである。なお、地震については、モデル化した神戸地盤の基盤から1995年兵庫県南部地震を入力した。

表層地盤の地震応答解析手法の概要

(1) 表層地盤のモデル化

本論では、飽和あるいは不飽和の堆積地盤が地震を受けたとき、不整形な堆積と液状化がローカルサイトに与える影響について解析し・考察する。そのため2相系飽和地盤に対するプログラムを作成して、これを全地盤に汎用的に適用していく。ここでは、2相系飽和多孔質媒体について2次元有限要素法により定式化した非線形有効応力解析プログラム「NUW2」²⁾を用いて不整形・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⁾・⁴⁾を組み込んだものを、有限要素法により定式化したもので、液状化にも対応できるものである。

(2) 吸収境界条件の適用

線形の飽和多孔質媒体における吸収境界条件を u (固体変位) - w (液体相対変位) で近似的に定式化

して、粘性境界条件（粘性ダンパー）となることとその精度についても明らかにしてきたが⁵⁾、これを無限領域からの寄与を考慮した形で対象領域へのトラクションとして定式化することにより、これを対象地盤（後出の Fig. 1）の両側方境界に適用する。

なお、2相系媒体における吸収境界条件の効き方は、P波とS波の伝播速度；

$$V_p = \sqrt{(\lambda + 2G + \alpha^2 Q) / \rho}, V_s = \sqrt{G / \rho}$$

に依存する²⁾。このとき、 λ 、 G はLameの定数、 ρ は密度、 α 、 Q は固体と間隙水の体積弾性率に関する定数であるが、特に、せん断弾性係数 G は(1)での解析中は一般に有効応力に依存することから時間依存となり、解析時刻 t での $G(t)$ を先に決定することは困難であるため、数値計算上では、微小前時刻 $t - \Delta t$ の確定値 $G(t - \Delta t)$ で代用する²⁾。

したがってまた、地盤の固有周期 T_G は G の関数であることから、液状化時にはその程度に応じて長周期化・動特性の変化が起こることになる。

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、大矢の三宮付近の概略地質断面図⁶⁾を参考にして Fig.1 のような神戸の地盤をモデル化するが（図の右が海側、左が山側で、水平幅は1,000m）、最下層は基盤として剛体とし、両側方の鉛直境界には提案する吸収境界条件を付加する。地表に露出した層L3, L5, L1の表面における各中間点を P_1 , P_2 及び P_3 としている。

地盤条件としては、Fig. 1の地盤断面図のL1からL5までの5層の N 値、 ρ （密度）及び液状化解析のための土質パラメータ（井合モデルにおける材料定数^{3), 4)}については、3軸試験の結果から内挿した値を採用しているが、それらを Table 1 に表示し

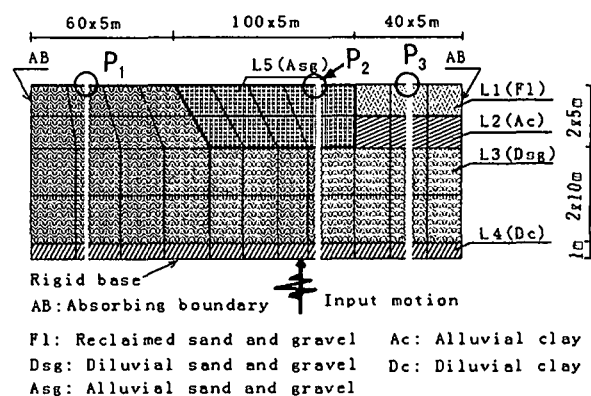


Fig. 1 A FE model of Kobe ground

ている。このとき、L3は洪積砂礫地盤で線形としている。また、地盤要素に共通基本パラメータとして、ポアソン比 $\nu=0.33$ ；透水係数 $k=1 \times 10^{-6}$ m/s, 間隙水の体積弾性係数 $K=2 \times 10^6$ kPa; $\alpha=1.0$ 。なお、各地層の初期剛性 G_0 は N 値から換算している。

地震波は、1995年兵庫県南部地震（ポートアイランドGL-31m、加速度波形NS成分）とし、最大加速度振幅を 5.5 m/s^2 として、基盤から鉛直上方に入射させる。

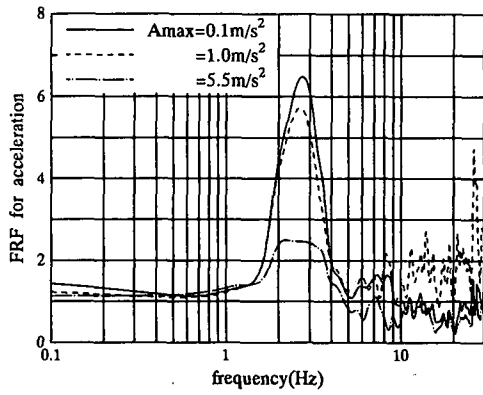
(2) 表層地盤の周波数応答関数に関する考察

Fig.2は、Fig. 1の断面に近接した地盤における、地表面の点 P_1 及び P_2 における加速度応答のフーリエスペクトルと基盤面の加速度入力波のそれとの比を加速度周波数応答関数(FRF)として、それぞれ(a)及び(b)に示したものである。加速度入力波の最大振幅(A_{max})の増大とともにL1層が液状化してゆが、これに対応して P_3 のFRFは増幅度が著しく低下し共振周波数も低下する。一方 P_2 でのFRFは、最大振幅が 5.5 m/s^2 では、共振周波数の低下はないものの増幅度は2.5倍まで低下するが、これは海側の液状化の影響を受けていることは明らかである。

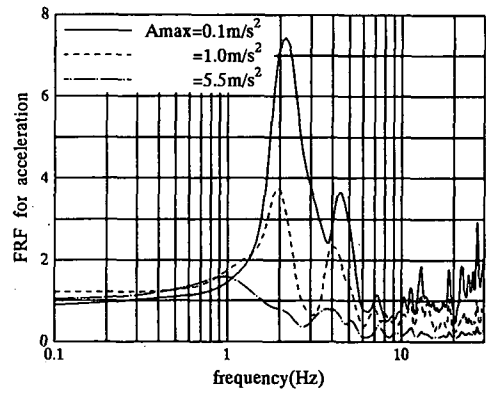
Table 1 Soil parameters for L1 to L5 in the Kobe ground model

Parameters	ρ	p_1	p_2	w_1	S_1	c_1	ϕ'_f	ϕ'_p	H_m	N
L1(F1)	1.8	0.5	0.85	16.4	0.005	1.0	31°	28°	0.3	10
L2(Ac)	1.7	0.5	1.03	5.9	0.005	1.6	30°	28°	0.3	3
L3(Dsg)	1.9	-	-	-	-	-	-	-	-	50
L4(Dc)	1.8	0.5	0.98	8.62	1.6	1.0	31°	28°	0.3	10
L5(Asg)	1.9	0.5	0.85	21.3	0.005	1.0	31°	28°	0.3	30

ρ is the density of soil ($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$), and N is the SPT N-value of soil.



(a) FRF at P_2



(b) FRF at P_3

Fig. 2 Frequency response function of ground surface (P_1, P_2)

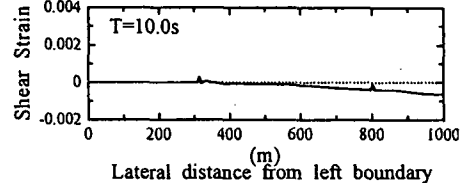
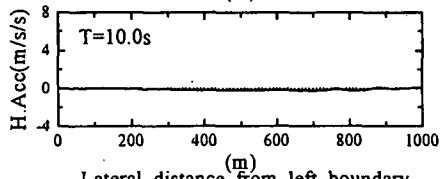
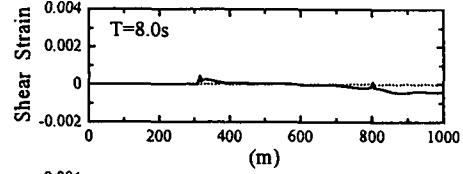
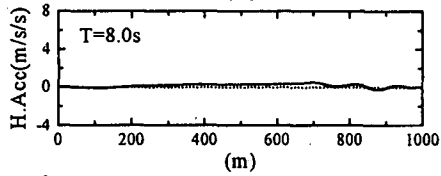
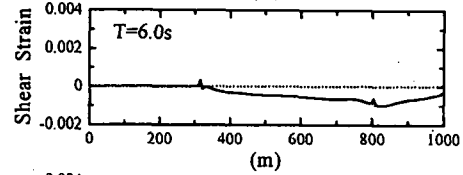
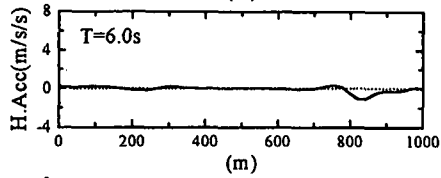
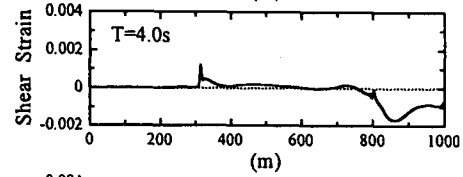
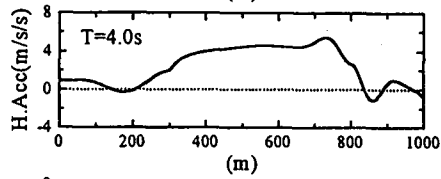
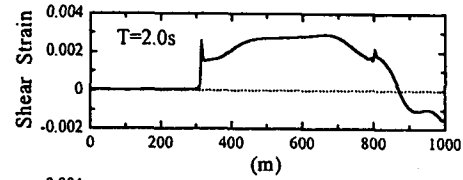
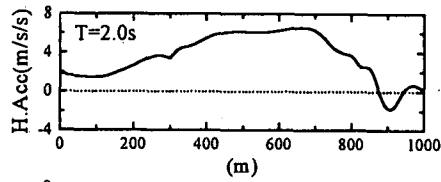


Fig. 3 The distribution of horizontal acceleration at ground surface and shear strain at the depth of 2.5 m at each time step

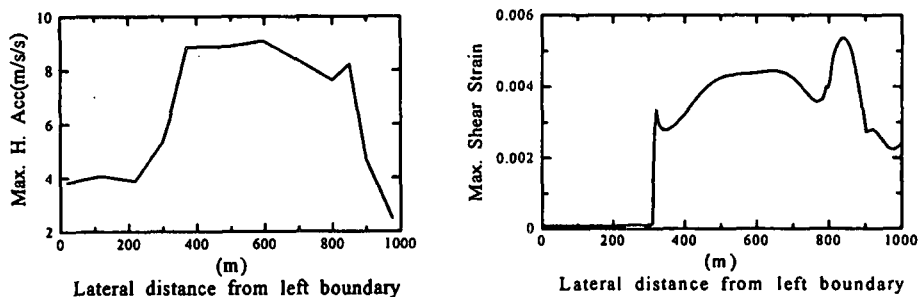


Fig. 4 Maximum acceleration at ground surface and shear strain at the depth of 2.5 m

(3) 地表面の水平加速度及びひずみ分布に関する考察

Fig. 3 は、時刻ごとの、地表面の水平加速度と深さ 2.5m におけるせん断ひずみの水平方向分布を図示したものであり、また、Fig. 4 は、地表面の最大水平加速度と深さ 2.5m における最大せん断ひずみの絶対値の分布を、モデル左端からの距離で示してある。

Fig. 3 より、加速度応答 (左図) が運動の初期に、沖積砂礫地盤 (L_5) に集中的に分布しており、同じ地盤断面が続くなら「震災の帯」となるが、この辺りは建築物が大被害を受けた地域に相当する。一方、右図から、海側の沖積粘土層と埋立層という軟弱地盤のため大きな地盤ひずみが出ており、液状化により引き起こされたものと解釈されるが、この地域がライフラインや杭基礎の大被害地域であることと符合している。

Fig. 4 (地表面の最大加速度及び最大ひずみの絶対値分布) も、前記の図とほぼ同様な傾向を示すが、強震動地域は、地盤モデル左端の境界から 300~600m の範囲で、沖積砂礫層に相当し、前記と同じ説明ができる。一方、右側境界から 200m の範囲では、変位とひずみが大きいことを示しており、埋設物の実被害の傾向と対応している。

4. まとめ

本研究は、「震災の帯」が地盤の堆積の不整形性と液状化との関わり合いを考察してきたが、地盤の不整形・不均質性の組み合わせにより増幅特性に強い非線形性の影響が現れ、沖積砂礫層の地表面加速度値による「震災の帯」が発生することを示し、また、埋立地では大変位・大ひずみにより地中構造物

への大被害が予測できることが分かった。

参考文献

- 1) Akiyoshi, T., Fuchida, K. & Fang, H.L., An absorbing boundary conditions for dynamic analysis of fluid-saturated porous media, *Int. J. Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.13, No.6, pp.387-397, 1993.
- 2) Akiyoshi, T., Fang, H.L., Fuchida, K., & Matsumoto, H., A Nonlinear seismic response analysis method for saturated soil-structure system with absorbing boundary, *Int. J. Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.20, No.5, pp.307-329, 1996.
- 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, 1992.
- 4) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T., Analysis of undrained cyclic behavior of sand under anisotropic consolidation, *Soils and Foundations*, JSSMFE, Vol.32, No.2, pp.16-20.
- 5) 秋吉 卓、孫 遜、淵田邦彦：2 相系地盤における波動吸収境界の誤差評価、土木学会論文集、No.619/I-47, pp.111-120, 1999.
- 6) 大矢 暁：兵庫県南部地震について、土と基礎、Vol.44, No.3, Ser. No.458, pp.3-8, 1996.