

不整形地盤の表面における地震応答集中について

秋吉 卓¹・淵田邦彦²・棗 治郎³・中嶋直紀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)

^{3,4}学生会員 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)

埋立地盤等を含む不整形堆積層では、液状化が発生するとその近辺の動特性が急に変質することから、周辺地盤の動特性、例えば固有周期やフィルタリング特性が影響を受けて、不整形な堆積地盤の表面では加速度や変位の卓越する地点が、地震強度に応じて移動することが考えられる。そこで本研究では、解析対象地盤モデルとして神戸地盤を取り上げ、これの沿岸部の液状化までを考慮して、特性の異なる 1995 年兵庫県南部地震波の強度を変化させて入力することにより、振動中の卓越周期の変化を考察するとともに、地表面の応答卓越地域と入力強度さらに液状化範囲との関係を考察する。

Key Words : *irregular grounds, liquefaction, natural period, 2D-FE analysis, absorbing boundary*

1. はじめに

1995 年の兵庫県南部地震では、山麓部の東西方向に幅 1~2km、長さ 30km にわたる“震災の帯”において構造物被害が多く、また沿岸部や埋立地域では、広範囲にわたる液状化の発生により、地下構造物に多大な被害が生じた。これらの原因としてさまざまな要因が考えられるが、ここでは神戸の地盤と大地震との組み合わせが、地盤の不整形な堆積のため地震動が表層地盤内で乱反射することによって、地表面で局所的にエネルギーを集中させ、また、沿岸部の埋立地域では、液状化によって地盤の剛性が急低下し、表層地盤の動特性の低周数波域化をもたらし、結果的に被害域の顕在化をもたらしたものと

解析を進める。また、液状化の発生による動特性の変化が周辺地盤の動特性、特に地表面の応答が集中する地域特性の影響についても検討を行う。本研究では神戸の地盤をモデル化し、地盤の不整形性と液状化に重点を置いて地震応答解析を行い、それらの連成について実際の被害状況と比較しながら検討していく。

2. 表層地盤の地震応答解析手法の概要

不整形・軟弱な表層地盤モデルの地震応答解析には、当研究室で開発した 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」を用いている。¹⁾ この解析プログラムは、Biot の 2 相混合体力論を基に、井合らの構成式を

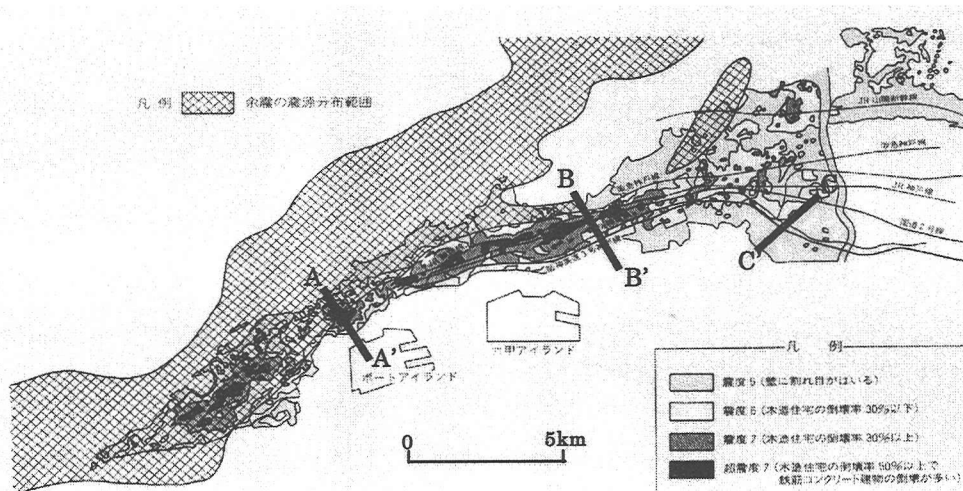


Fig. 1 神戸付近地図³⁾

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。

(1) 表層地盤のモデル化

解析の対象とした表層地盤モデルは、阪神・淡路大震災調査報告書の南北地層断面図²⁾を参考にして、平面図をFig. 1³⁾に示し、神戸市中央区三宮付近のA-A'断面、神戸市東灘区岡本付近のB-B'断面および西宮市甲子園付近のC-C'断面を2次元モデル化して示したのがFig. 2である。本来ならば無限領域で取り扱うべき地盤を、本研究では2次元の有限領域にモデル化して数値解析を行う。Fig. 2においては、それぞれ水平方向1000mの地盤モデルで、モデル左側が山側、右側が海側である。モデルの両側方境界には前述の吸収境界条件を付加し⁴⁾、地震波の透過を助けている。A-A'およびB-B'断面は、震災の帯を直角に横断しており、傾斜などに違いが見られるが、山側や深層部分の洪積砂礫層が広く分布していることがわかる。一方、C-C'断面は震災の帯から少し離れたところに位置しており、震度も5~6の範囲で、A-A'およびB-B'断面とは異なりほぼ一般的な地盤構成をしている。地層の設定は、L1層を山側や深層部分の洪積砂礫層、L2層を深層部の洪積粘土層、L3層を建物が集中している沖積砂礫層、L4層を沖積砂礫層に沖積粘土層が混じった層、L5層を軟弱地盤である埋立土層、L6層を深層部の沖積粘土層、L7層を軟弱粘土層である沖積粘土層とした。本解析に用いるプログラム「NUW2」は井合ら⁵⁾の有効応力解析に関わる地盤パラメータを用いているが、それらをTable. 1に示している。

(2) 入力地震波

Fig. 3の入力地震波は、1995年兵庫県南部地震（ポートアイランド GL-32m、加速度波形 NS成分）とし、液状化による地盤の伝達特性の変化を見るため、最大加速

度を0.1m/s²、1.0m/s²および5.4m/s²に調整した3種類の地震波を各モデルの下方の基盤から鉛直上方に入射させている。

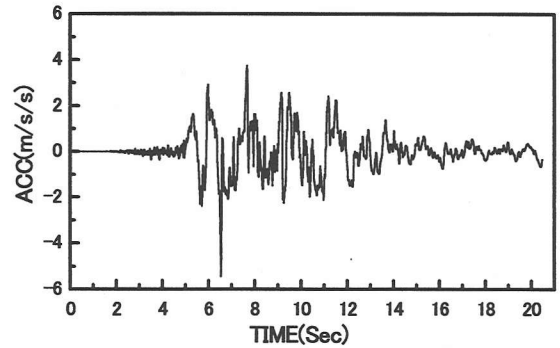


Fig. 3 入力地震波

3. 解析結果と考察

Fig. 4は、前述の地震波の最大加速度振幅を0.1m/s²、1.0m/s²および5.4m/s²としたときの、A-A'、B-B'およびC-C'断面における地表面の水平加速度応答、地表面から深さ5mにおける過剰間隙水圧比およびせん断ひずみの最大値を示したものである。過剰間隙水圧比、せん断ひずみの最大値分布を見ると、A-A'およびB-B'断面は、5.4m/s²という大加速度に対して、海側（図の右側）に行くにつれて増加しており、特に埋立土層や沖積粘土層などの軟弱地盤が堆積している部分では急激に増加しているが、この地域は地下構造物やライフラインに多大な被害が生じたところである。一方、C-C'断面では、過剰間隙水圧比は大入力に対して不完全な液状化にとどまり、海側・山側に関係なくほぼ一定した値を示しており、また最大せん断ひずみは入力に関わらず低い値にとどまり、一定の分布となっている。次に、地表面水平加速度応答の最大値分布を見ると、A-A'およびB-B'断面

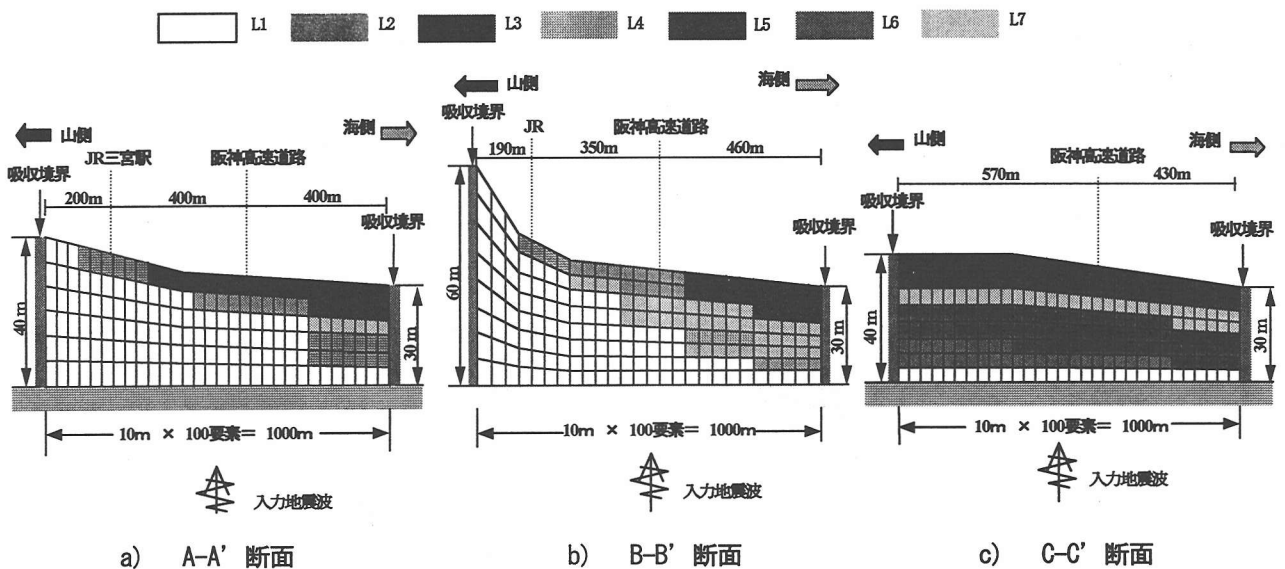


Fig. 2 地盤断面モデル

Table. 1 地盤断面モデルに用いた物性値

地盤名	N 値	ρ	p_1	p_2	w_1	S_1	c_1	ϕ_f	ϕ_p	H_m
L1	50	1.9	-	-	-	-	-	-	-	-
L2	34	1.9	0.5	0.85	24.14	0.005	1.00	31.0°	28.0°	0.30
L3	30	1.9	0.5	0.85	21.30	0.005	1.00	31.0°	28.0°	0.30
L4	25	1.8	0.5	0.85	17.75	0.005	1.00	31.0°	28.0°	0.30
L5	10	1.8	0.5	0.85	16.40	0.005	1.00	31.0°	28.0°	0.30
L6	10	1.8	0.5	0.85	8.62	0.005	1.00	31.0°	28.0°	0.30
L7	3	1.7	0.5	1.03	5.90	0.005	1.60	30.0°	28.0°	0.30

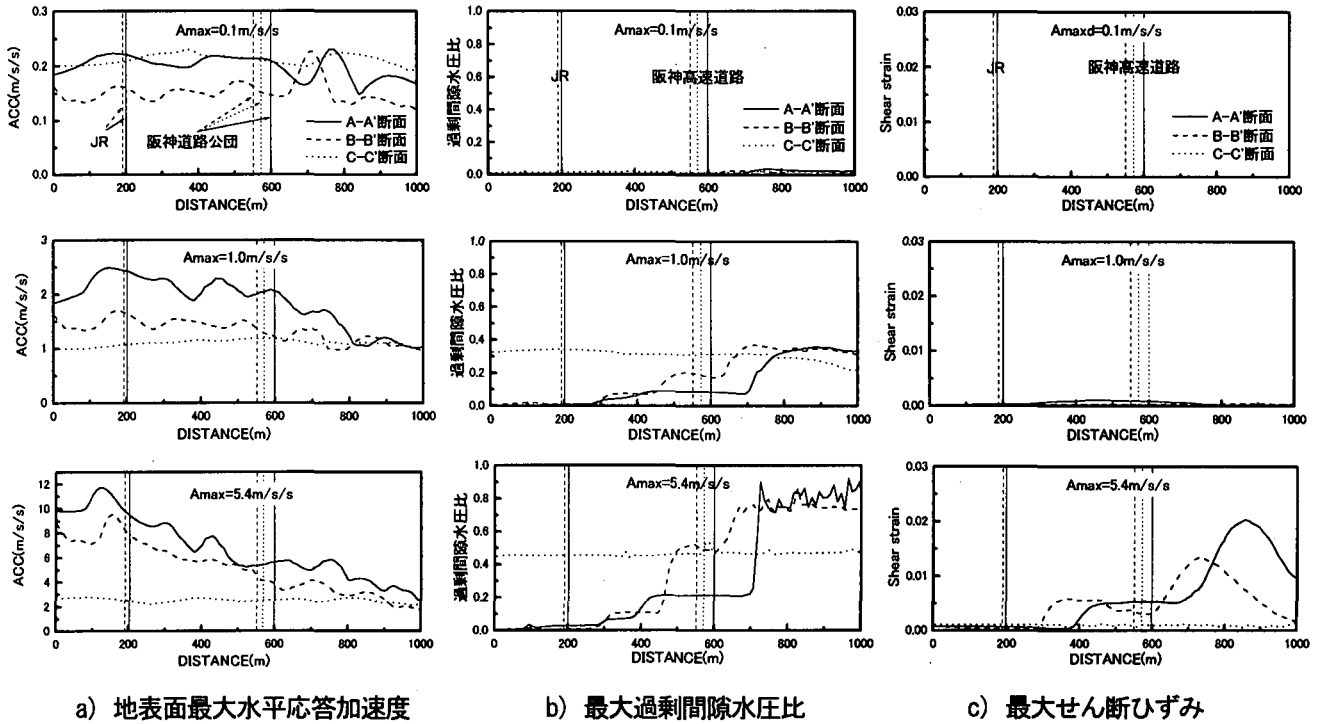


Fig. 4 地表面近傍における最大応答値の分布

では、入力最大加速度振幅が 0.1m/s^2 の時のピーク地点が 800m 付近、 1.0m/s^2 では 200m 付近、 5.4m/s^2 では 150m 付近と入力強度が増加するにつれピーク地点が山側に移動し、顕在化していくことが分かる。特に実入力に近いと思われる 5.4m/s^2 では、両断面ともにピーク時の地表面応答加速度は非常に大きく、中でも A-A' 断面における分布のピーク値は 11.7m/s^2 にも達し、その周辺でも最大加速度が 10.0m/s^2 を越える地域がありうるが、実際の地震でも JR 三ノ宮駅をまたいだ南北の地域で、震度 7 に相当する被害が生じている。一方、C-C' 断面においては、局所的に加速度が集中することもなく、入力最大加速度振幅 5.4m/s^2 に対して、応答加速度は大きくならず、ほぼ一定値分布を示している。以上のように、地表面の応答加速度に関しては、入力加速度の大きさとともに加速度伝達特性の低下が進む海側との連成から山側に応答加速度の集中域が形成されていくことが示され、加速度災害としての「震災の帯」が大入力と神戸地盤との組み合わせがあって初めて発生した現象と理解される。また、最大せん断ひずみは、 5.4m/s^2 入力時で

は、海側のみならず、市中心域（地盤モデル中央部）でも大きな値となり、これが地中構造物被害分布の大小とよく対応していることがうかがえる。次に、入力強度の差異による地盤動特性の変化をその固有周期から検討したのが Fig. 5 である。図は、入力最大加速度振幅 A_{max} を 0.1m/s^2 、 1.0m/s^2 および 5.4m/s^2 としたときの A-A'、B-B' および C-C' 断面の地盤の固有周期 T_c （基礎面は水平にとっている）の時間的変化（受震後時刻 $T=4, 12, 20\text{sec}$ ）について示した。振動開始後 $T=4\text{sec}$ では、まだ主要動の前なので、液状化等も発生せず、したがって地盤は初期の地盤剛性のままで入力に関わらず T_c の地域的変化はない。すなわちこれが線形時の T_c を示している。 $T=12\text{sec}$ では、主要動後のため A_{max} の大きさ次第で液状化が海側に発生し、地盤のせん断剛性の低下、したがって T_c の長周期化となって現われている。 $A_{max}=0.1\text{m/s}^2$ が入力した場合、3 断面ともほとんど地盤の固有周期 T_c に変化はみられず、この場合の地盤の固有周期は初期の地盤剛性を示している。ここで剛性の高い山側の地盤の T_c が断面中央部の T_c より大きくなっているのは、山側のほうが層の

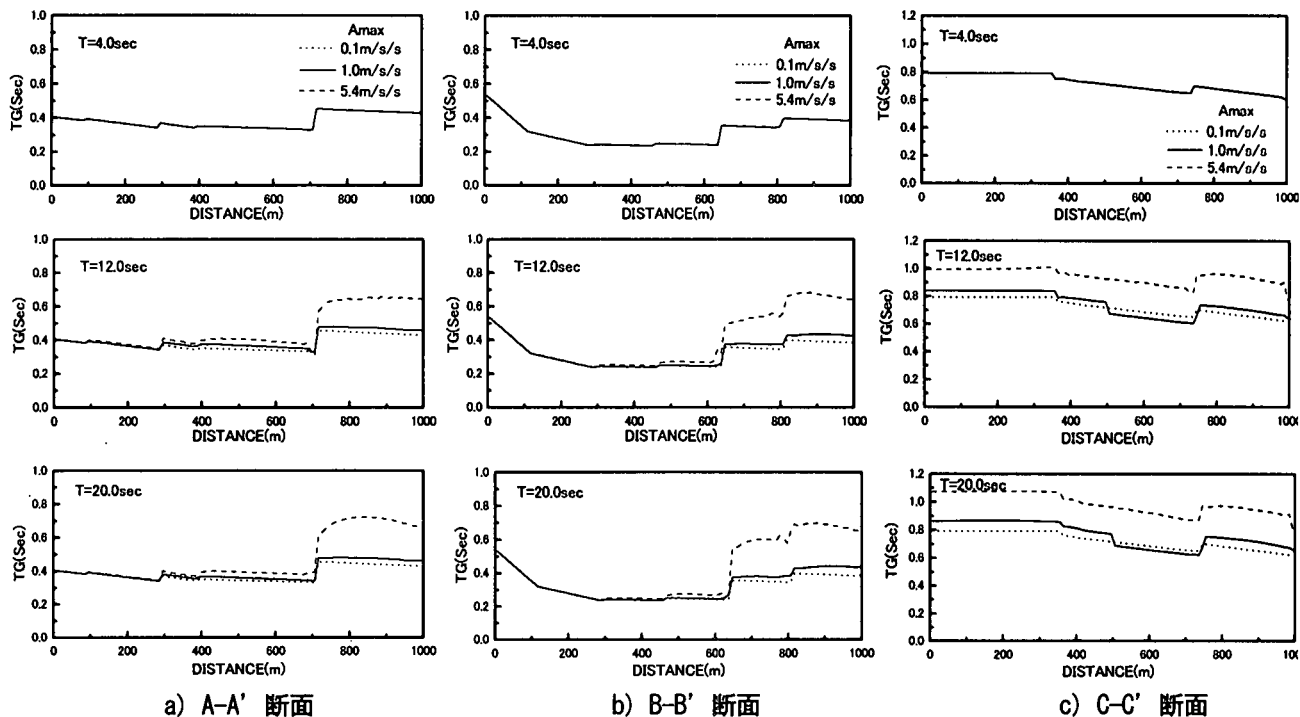


Fig. 5 固有周期の時間的変化

厚さが厚くなっており、海側に行くにしたがって薄くなっているからである。次に $A_{max}=1.0m/s^2$ の場合、微小入力 $A_{max}=0.1m/s^2$ と比較すると、海側の軟弱地盤において時間的に若干の変化はみられるが、動特性に変化が起きたというほどの大きな変化ではない。さらに $A_{max}=5.4m/s^2$ の場合では、A-A' および B-B' 断面では $T=5sec$ 以後、前2ケースの $0.1m/s^2$ および $1.0m/s^2$ 入力における T_g と比較しても分かるように、海側の軟弱地盤側にいくにつれて、 T_g が長周期化していることがはっきりと分かる。これは先述の Fig. 4 において、 $A_{max}=5.4m/s^2$ 入力時の最大過剰間隙水圧比が、地盤の固有周期と同じように、海側の軟弱地盤で急激に増加していることから、液状化の影響であろう。一方、C-C' 断面では、不完全ではあるが液状化発生のため断面全体で地盤の固有周期が長周期化している。これは、A-A' および B-B' 断面に比べて、剛性の高い地盤が含まれておらず、地盤構成が全体的にほぼ均質であることがあげられる。また、A-A' および B-B' 断面での液状化発生による地盤の固有周期の長周期化から、地盤はローパスフィルター状となり、軟弱地盤側で地表面最大水平応答加速度が低下し、最大せん断ひずみが急激に増加したということもいえる。さらに、ほぼ地震動がおさまったと考えられる20秒後の段階でも長周期化がおさまっていないことから、永久的な地盤剛性の低下が起きていると考えられる。

4. まとめ

本研究では、地盤構成がかなり異なる神戸地域の3断面を用いて解析を行ったが、地層構成の若干の相異にもかかわらず、A-A' および B-B' 断面においては、ほぼ類似の結果を得たが、C-C' 断面においては、全く異なる結

果を得た。すなわち、不整形性の強いA-A' およびB-B' 断面の地盤では、入力強度とともに、海側の液状化が進むにつれ、加速度応答のピーク地点が海側から山側に移動し、'震災の帯'の地盤のような加速度分布が出現することがわかった。また神戸地盤に、大強度の地震が入力すると、埋立土層や沖積粘土層などの軟弱地盤が堆積している部分での液状化による大ひずみが発生するだけでなく、隣接の市中心域でもかなり大きなひずみが発生することが示され、広範囲に分布する地中構造物の実被害分布を説明しうることも分かった。C-C' 断面のように、地層構成が比較的一様である場合は、局所的に加速度が集中する地域もなく、入力加速度に応じて加速度、過剰間隙水圧比、最大ひずみおよび地盤固有周期は一様変動することがわかった。

参考文献

- 1) T.Akiyoshi, H.L.Fang, K.Fuchida and H.Matsumoto, 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.
- 2) (社) 地盤工学会・阪神大震災調査委員会：阪神・淡路大震災調査報告書(解説編)、pp.222-224,平成8年3月。
- 3) 田村 重四郎：「阪神・淡路大震災の特徴」土木施工、pp.4-8,1995年8月号
- 4) T.Akiyoshi, K.Fuchida and H.L.Fang, 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.
- 5) K.Ichii, S.Iai and T.Morita, Performance of the quay wall with high seismic resistance, J.Struct.Mech.Earthquake Eng., JSCE, No-654/I-52, pp.39-50, 2001.