地盤振動特性と地震被害分布との関連性について

渕田邦彦[1]・秋吉　卓[2]・松本英敏[3]

[1]八代工業高等専門学校土木建築工学科教授（〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627）
E-mail:fuchida@as.yatsushiro-nct.ac.jp
[2]熊本大学工学部教授　（〒860-8505 熊本市黒髪2-39-1）
E-mail:akiyoshi@gpo.kumamoto-u.ac.jp
[3]熊本大学工学部技術専門職員　（〒860-8505熊本市黒髪2-39-1）
E-mail:matsumoto@ gpo.kumamoto-u.ac.jp

1995年の兵庫県南部地震では，構造物被害が集中した震災の帯が出現した．本研究では，神戸地域の８断面の地盤構造をモデル化し，２次元有効応力解析により，地表面近辺の加速度応答及び地盤ひずみの応答分布を，震災の帯や配水管被害分布との対応について検討した．数値計算の結果，洪積砂礫層に沖積砂礫層が載ったエッジ部では減衰しない波の重複により地表面に加速度が集中しやすいこと，山側から沿岸部に近づくにつれて地盤の非線形性が著しくなり加速度応答が低下すること，解析による計測震度と地盤ひずみの分布は，震災の帯や配水管被害率分布などの実被害分布とよく対応していることなどを明らかとした．

Key Words : *heavily damaged zone, damages of water pipeline, seismic intensity, liquefaction, Effective stress analysis*

１．はじめに

1995 年兵庫県南部地震では，神戸地盤における加速度エネルギーの局所的集中により，震度７のいわゆる“震災の帯”が出現し，構造物被害が顕著であった．この現象はこれまで，神戸地盤と大地震との組み合わせ及び地盤の不整形な堆積による地震動の表層地盤内での乱反射，渚現象，エッヂ効果などとして説明され，また地盤の地震応答特性を速度，変位，ひずみなどから評価する研究も行われている．

著者らは，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波域化をもたらしたという点に着目し，入力強度と伝達特性の面から検討してきた．すなわち地盤の非線形特性を，入力の強度に依存した地盤の伝達特性の変化，相互干渉から特定の場所への応答の集中が起こるメカニズムについて検討している[1)]．

本研究では，線形から液状化までを解析可能な，独自に開発したプログラムを用いて，モデル地盤として神戸の地盤をモデル化した解析を行い，地表面の応答加速度と‘震災の帯’との比較，評価に加えて，埋設管路に影響が大きいとされる地盤ひずみ，特に沿岸部の埋立地域における液状化による大ひずみ分布と埋設管路の被害分布とを比較し，地盤応答とその影響を受けやすい構造物被害との対応性について検討する．すなわち地域全体の被害予測を目指して，解析結果と実被害分布との相関と解析の妥当性について検討するものである．

２．解析手法の概要と解析モデル

本研究における地震応答解析は，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)]により行った．このプログラムは，Biotの２相混合体理論に基づいて，井合らによる構成式を組込んだものであるが，その詳細は文献2)に譲る．このとき側方境界では，仮想境界上で波動エネルギーを吸収させる吸収境界条件[3)]により反射波の影響を除いている．

入力地震波は，**図１**に示す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及びUDの２成分）とし，地盤の非線形な伝達特性の変化を見るため，最大加速度振幅を0.1m/s^2，1.0m/s^2，5.4m/s^{2}及び10.0m/s^{2}に調節した４種類の地震波を地盤モデル下方の基盤から鉛直上方に入射する．このとき地盤モデルの底部にはN値50以上の基盤面を水

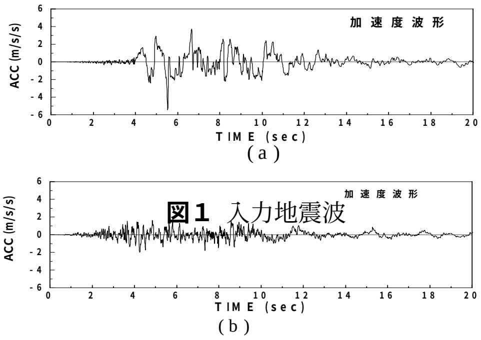


図１　入力地震波

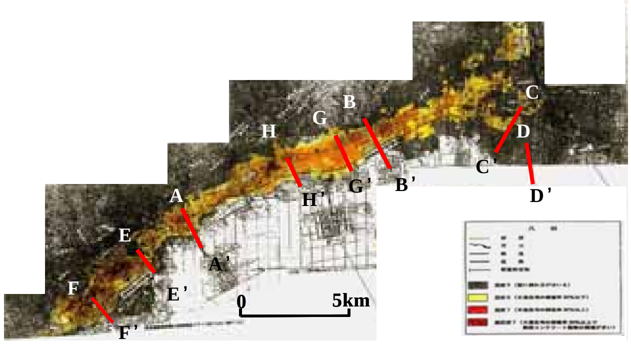
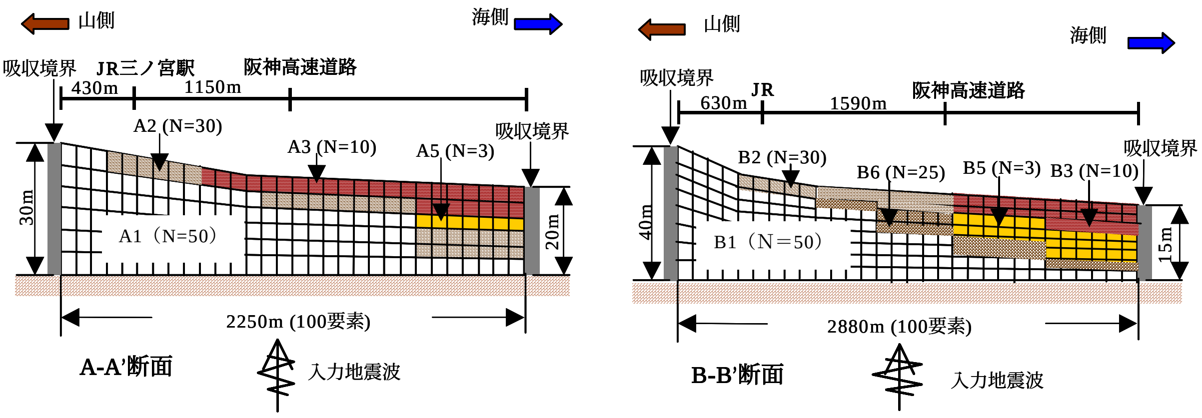
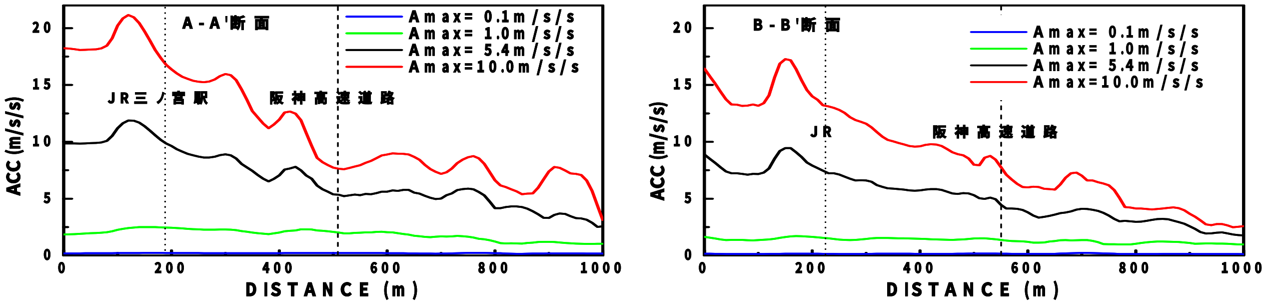


図２　神戸付近地図[4)]



(a)A-A'断面　　(b)B-B'断面

図３　モデル地盤



(a)A-A'断面　　(b)B-B'断面

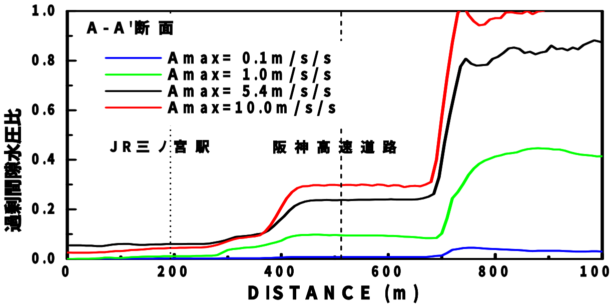
図４　最大応答加速度

平に設定し，その上に表層地盤が載るものとする．神戸の実地盤断面を解析の対象とした表層地盤モデルは，図２に示した神戸市中央区三宮付近のA-A'断面から神戸市灘区と東灘区の境界付近H-H'断面までの全８断面について南北地層断面図[4)]を参考にして地盤断面を２次元モデル化した．

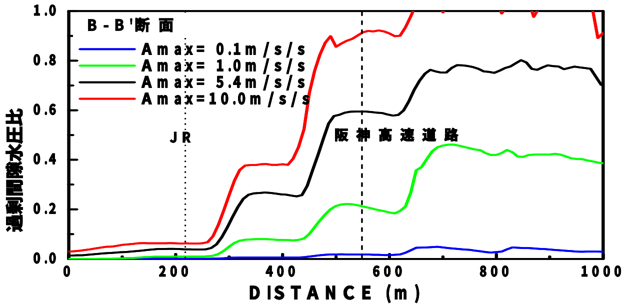
図３は，**図２**で選定した８断面を２次元モデル化したものの一例であり，各モデルの全要素は非線形・２相系有限要素である．各断面ともに水平方向には 100 要素に分割し，鉛直方向は 6～8 要素に分割しており，モデルの左側が山側，右側が海側である．また各地盤の種類は A1，B1 層を山側や深層部分の洪積砂礫層，A2 ，B2 層を沖積砂礫層，A3，B3 層を軟弱地盤である埋立土層，A5，B5 層を軟弱粘土層である沖積粘土層，B6 層を沖積砂礫層に沖積粘土層が混じった層とした．

３．数値計算結果と考察

図４，５は，入力地震波の最大加速度振幅Amaxを0.1,1.0,5.4,及び10.0m/s^{2}に変換させたときのそれぞれ地表面最大水平応答加速度と最大過剰間隙水圧比を示したもので，両図とも(a)，(b)はそれぞれ**図２**の断面A-A'及びB-B'における応答である．最大加速度振幅Amax=0.1～1.0m/s^{2}程度の地震強度では地表面の加速度は２倍程度でほぼ一定の線形応答特性が強いが，入力強度がAmax=5.4m/s^2～10.0m/s^{2}と増大すると，山側（洪積砂礫層）など硬い地盤を含

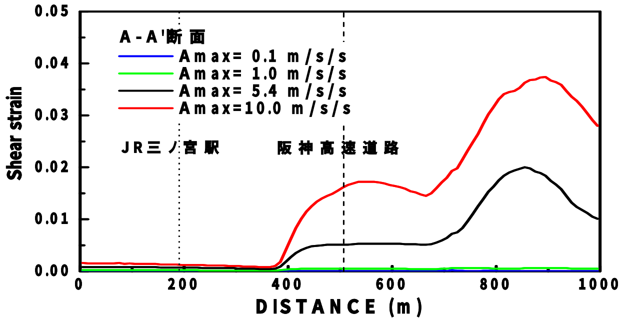


(a)A-A'断面

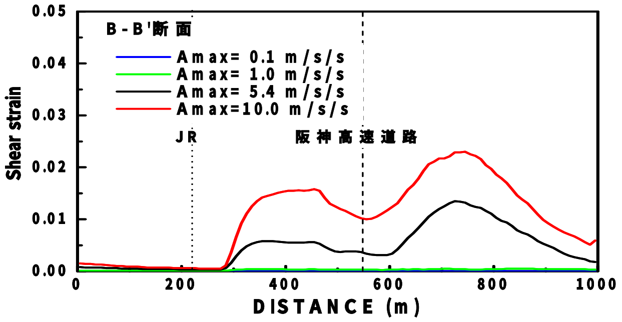


(b)B-B'断面

図５　最大過剰間隙水圧比



(a)A-A'断面



(b)B-B'断面

図６　最大せん断ひずみ

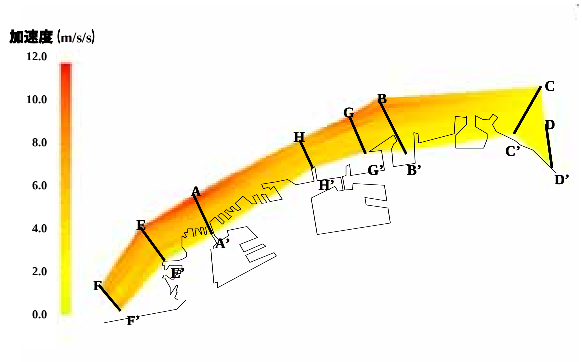


図７　最大応答加速度分布

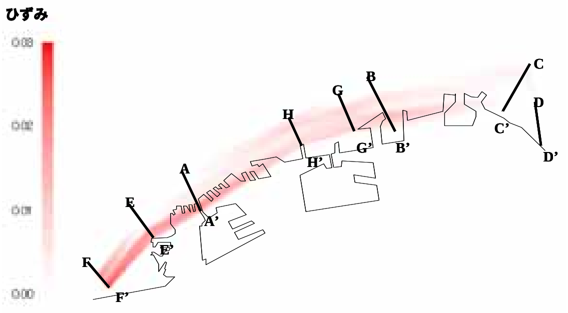


図８　最大せん断ひずみ分布

む特定の地域で加速度応答が大きく増幅されるのに対して，沿岸部埋立地域においては急激に加速度応答倍率は低下する．このように山側の洪積砂礫層上に加速度が局所的に集中している地域と実際に構造物に多大な被害が生じた地域（震災の帯）とが対応している．また**図５**より，入力強度がAmax＞5.4m/s^{2}の場合，図中右側の沿岸部埋立地域では過剰間隙水圧比が１に近く，ほぼ液状化の状態になることがわかる．この結果，そのような場所では**図６**のように地盤のせん断ひずみが増加し，これがライフライン被害に影響すると考えられる。以上より，神戸のような地盤構成では，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ることとなり，入力加速度の大きさと地盤構成の組み合わせの必然の結果として兵庫県南部地震の‘震災の帯’が発生したのではないかと考えられる．

図７，８は，最大加速度 Amax=5.4m/s^2 を入力した場合のそれぞれ最大加速度，最大せん断ひずみ応答結果を，また**図９**は配水管路被害率の分布をコンター表示したものである．

図７より，山側の方で最大加速度が局所的に集中し，いわゆる‘震災の帯‘と呼ばれる震度の強かったところとほぼ対応するような加速度の集中域が形成されていることがわかる．この結果は，大まかではあるが，実際の震度階や構造物の被害と対応しているものと思われる．

図８の最大せん断ひずみ分布を見てみると，海岸部の軟弱地盤上で大きな値を示しており，**図９**の管路被害の集中区域とせん断ひずみの集中域と相似性が認められる．また**図６**の最大せん断ひずみ分布と比較すると，A-A'断面におけるポートアイランドの東西沿岸部など最大せん断ひずみが濃密なところでは，管路被害域とも重なっており，特に全体的に震災の帯より南側（沿岸埋立部）で生じていることが対応している．

さらに，配水管路被害率と最大せん断ひずみとの

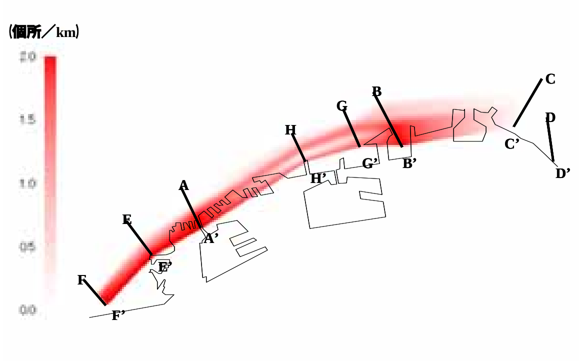


図９　配水管路被害率分布

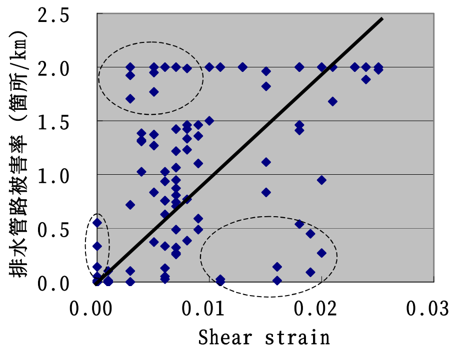


図 10　配水管路被害率とせん断ひずみの関係

関係を見るために，本研究で解析した８つの各断面において，50 m間隔で 20 地点のせん断ひずみを求め配水管路被害率の関係を示したのが**図 10** である．配水管路被害率と最大せん断ひずみとにはある程度の相関が見られ，両者を直線回帰したものも図中に示している．一方，両者の関係で，せん断ひずみが1～2%でも配水管路被害率が小さい場合や 0.5%未満で配水管路被害率が大きい場合も見られるが，この原因としては，配水管路の埋設位置，配水管路の口径，管種，継手構造などの要因が考えられる．例えば，管軸方向のひずみと軸直角方向のそれとでは被害の生じ方が異なることや [6)]，また配水管路が最新の耐震継手で口径大の場合には 1～2%程度のひずみでは被害防止可能なこと，管路が単なる伸縮継手で口径が小さい場合には 0.5%程度のひずみでも被害率が大きくなる可能性がある，などである．

４．まとめ

本研究では，地表面付近の地震エネルギーの集中が起こる現象を，不整形堆積地盤の乱反射だけでなく液状化現象をも考慮した総合的な現象として神戸地盤について地震応答解析を行い，1995 年兵庫県南部地震の実被害例と比較しながら検討した．得られた成果は以下のように要約される．

(1) 洪積砂礫層に沖積砂礫層が載った地盤，すなわち比較的線形的に加速度を増幅しやすい構造では，地表面に加速度の集中が生じやすい．

(2) 沿岸部に近いほど地盤の非線形化が著しくなり，それだけ加速度応答は低下し，これが上述(1)の加速度分布のピークを顕在化する．

(3) 解析による最大応答加速度と地盤ひずみの分布は，‘震災の帯’や配水管路被害率分布などの実被害分布とよく対応する．

参考文献

1)秋吉　卓，渕田邦彦，松本英敏，丸野寛之：神戸地盤の地震応答集中特性について，第11回日本地震工学シンポジウム論文集，CD-ROM，Paper No. 162，2002.

2)Akiyoshi, T. Fang, H.L., Fuchida, K. and 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)Akiyoshi, T., Fuchida, K. and 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, 1994.

4)土木学会関西支部：大震災に学ぶ，阪神・淡路大震災調査研究委員会報告書，第２巻，pp.5-6，1998.

5)高田至郎、前田俊宏、棚橋隆司：ポートアイランドにおける地盤ひずみ分布と上下水道被害，神戸大学工学部土木系教室兵庫県南部地震学術調査団，1996

(2003. 10. 1 受付)

CORRELATION BETWEEN RESPONSE CHARACTERISTICS OF GROUND AND DAMAGE DISTRIBUTIONS OF KOBE EARTHQUAKE

Kunihiko FUCHIDA, Takashi AKIYOSHI and Hidetoshi MATSUMOTO3

In the 1995 Hyogoken-nanbu earthquake, structural damages of buildings and buried pipelines are concentrated at the special sites of Kobe ground, such as along the “heavily damaged zone” of JMS=7 or in the liquefied area. This study presents the contour maps of maximum response accelerations and strains at the ground surface by using two-dimension of the effective stress analysis program and shows that these results agree well with the actual seismic damage spreads.