

阪神淡路大震災における地盤液状化とSCP工法の対策効果について

八代工業高等専門学校 ○淵田邦彦*
熊本大学工学部 秋吉 卓**
熊本大学工学部 松本英敏**
若築建設 兵頭武士***

阪神淡路大震災における地盤災害の中で、臨海部の人工島や埋め立て地で生じた液状化の問題を取り上げ検討する。ボーリング資料の得られた数地点を柱状モデル化し、道路橋示方書の液状化簡易判定法と1次元の地震応答解析プログラム「SHAKE」を組み合わせる方法により各地点における液状化予測を行った。その結果、臨海部における液状化の可能性が高い結果を得た。次に、著者らの開発した2次元有効応力解析プログラム「NUW2」を用いてポートアイランド地震観測点における液状化解析を実施し、さらに同地点にてSCP改良をシミュレーションプログラム「WAP3」にて行い、改良地盤の液状化解析をも行った。その結果、SCP地盤改良を行うことによって当該地点における液状化防止に効果があることを確認した。

1. はじめに

1995年1月17日の阪神淡路大震災では、淡路島北西部や、神戸市、芦屋市、西宮市等において甚大な被害が生じた。特に神戸地域では、近代都市を襲った直下型地震による国内で初めての地震災害であったことから、各種土木構造物及び建築物等に多大な被害を生じた。懸命な復旧活動とともに、地震直後からさまざまな調査・研究が各種の機関において続けられている。都市直下で起こる強い地震に対する対策をどのように考えていくかなど、単に耐震設計の問題だけでなく、社会問題や経済問題などいろいろな分野で各種の提言も出され始めている¹⁾。以上のように、この震災では多くの分野で様々な検討がなされる必要があると考えられるが、本論文では、阪神大震災で生じた地盤災害を取り上げる。その中でも、とくに臨海部の人工島や埋立て地で発生した液状化の被害に的をしぼり、観測記録等を基に液状化予測及び解析を実施し、主として臨海部の埋立地における液状化について検討する。

2. 神戸地域の地盤構造

神戸地域は、北側の六甲山系と南側の大阪湾に挟まれた東西に伸びる細長い帯状の地域からなり、そこに人口及び都市機能が集中している。この地域の地形は、六甲山の造山活動に伴う基盤隆起により形成されたもので、その地殻変動の過程においていくつもの断層が生じ、それらは逆断層であることが知られている²⁾。このような造山活動の過程の後、神戸市街地の海側に沖積層の堆積が始まり、縄文のある次期には海岸に沿って海成の沖積粘土が堆積された。図1は上記のような過程で形成された神戸市街地の典型的な地層断面の例である³⁾。神戸市街地の多くは砂及び砂礫を主とする比較的良質な材料で覆われており、海岸部に沿った地域は、軟弱な沖積粘土層が堆積している。図より、堆積した沖積粘土層とその下部の洪積層は海側に向かって深く傾斜していることがわかる。神戸ポートアイランドや六甲アイランドは、この軟弱沖積粘土の上に埋め立て材を投入して造成されている。

次に図2は、神戸地域の臨海埋立地区の海岸に沿う海底地盤の地質構造を示したものである⁴⁾。臨海埋立地の下部には厚い沖積粘土層が堆積しており、その下に砂と砂礫を主体として薄層の粘土を含む厚い地層が連続し、さらにその下には洪積粘土層が堆積している。また図より、これらの地層は西側に向

* 八代工業高等専門学校土木建築工学科,
0965-35-1611

** 熊本大学工学部土木環境工学科, 096-342-3538

*** 若築建設土木本部設計部, 03-3492-0495

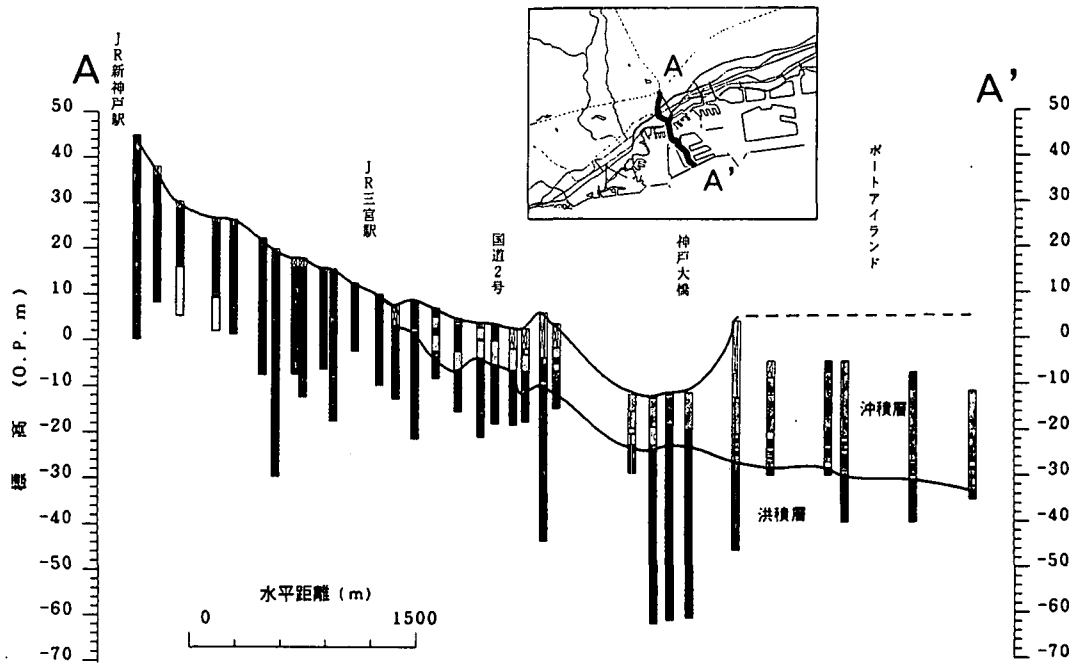


図1 神戸地域の地質断面³⁾

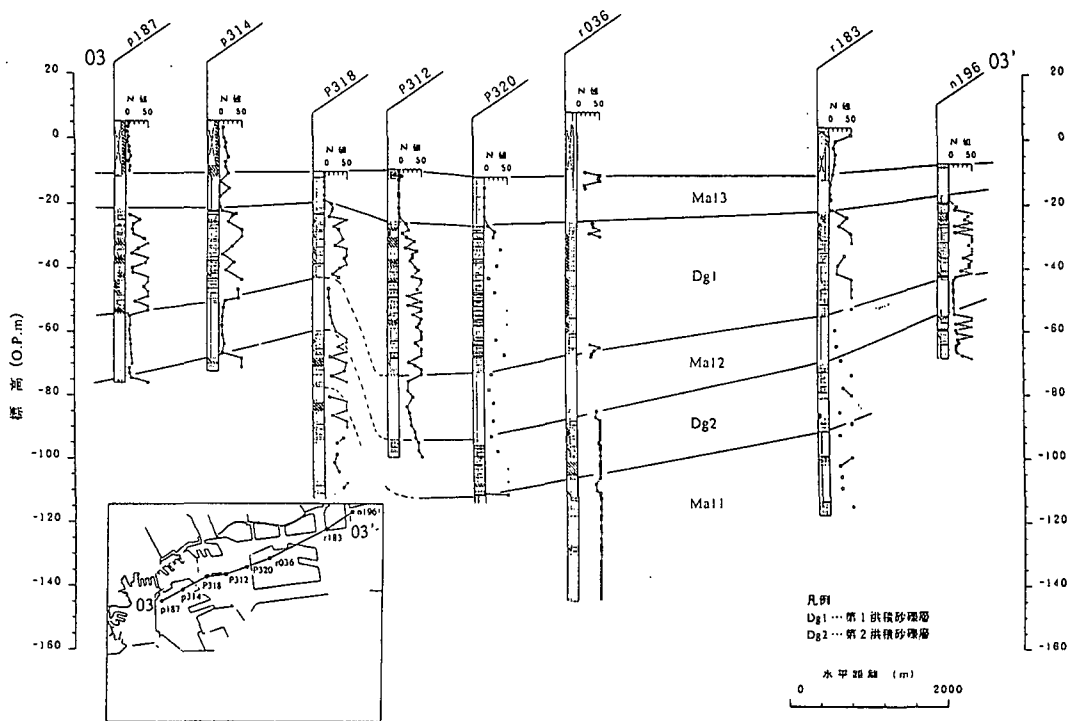


図2 神戸港地域の海底地盤地質断面⁴⁾

かって深く傾斜していることがわかる。

3. 臨海埋立地における地盤災害の概要

阪神淡路大震災では、神戸地域の臨海埋立造成地である西宮甲子園埋立地、六甲アイランド及びポートアイランドなどで広い範囲にわたって液状化が生

じた。このような地盤の液状化によって、護岸構造物の側方移動と背後地の沈下、橋梁基礎の水平移動に伴う桁の落下や支承部の破壊などの被害が生じたものと考えられる。すなわち地震被害の特徴として、埋立地における液状化現象、護岸構造物の側方移動及び護岸近傍の橋梁基礎の変状などが挙げられる。

以下では、このような構造物の被害の主たる原因と考えられる、臨海部における地盤の液状化について考察する。

4. 地震応答解析を用いた液状化の予測

図3は、石原・安田⁵⁾によって、地震直後に撮影された航空写真の観察より得られた神戸地域で噴砂・噴水の生じた場所を明示したものであり、それらは図中黒く塗られた場所で示されている。図より、海岸線に沿う埋立地の広い範囲にわたって液状化が生じたことがわかる。本節では、重複反射理論に基づく地震応答解析手法として代表的なプログラム「SHAKE」⁶⁾と道路橋示方書⁷⁾に規定されている液状化判定法とを組み合わせた方法⁸⁾により、神戸地域の臨海部の数点における液状化判定を行う。ここでは、著者らが入手しているボーリング資料の中から、臨海部に近い5点を選んで地盤構造を柱状モデル化し、解析に用いることとする。図3中の○印は、解析対象の地点を示している。一方、ポートアイランドの北西部において(図3中の○Port I.)、深度

方向4カ所の位置で神戸市による地震観測結果が得られており、これらの記録は「関西地震観測研究協議会」⁹⁾により公開されている。図4はこれらの記録の内、深さ方向4点における地震加速度NS成分の主要動20秒間の記録を明示したものである。図より、強い地震動が10秒ほど続いたことや、深部から3地点の加速度記録は比較的類似しているのに対して地表面での加速度波形は短周期成分が小さいなめらかな波形であることがわかる。図5(a),(b)は図4のそれぞれ深さ0m, -83mにおける加速度波形のFourierスペクトルである。図5(a)の地表面における記録は、(b)の深さ-83mにおける記録よりも、高振動数域で小さく、低振動数域で大きくなっている。図4及び図5より、この地点では埋土層で液状化が生じたことが加速度記録にも現れていると考えられる。

そこで図3に示された5地点に対して、各点の洪積砂礫層の上面に露頭基盤の条件で、図4の深さ-32mにおける加速度記録を入射波として入力した場合の、「SHAKE」による地震応答解析及び液状化予

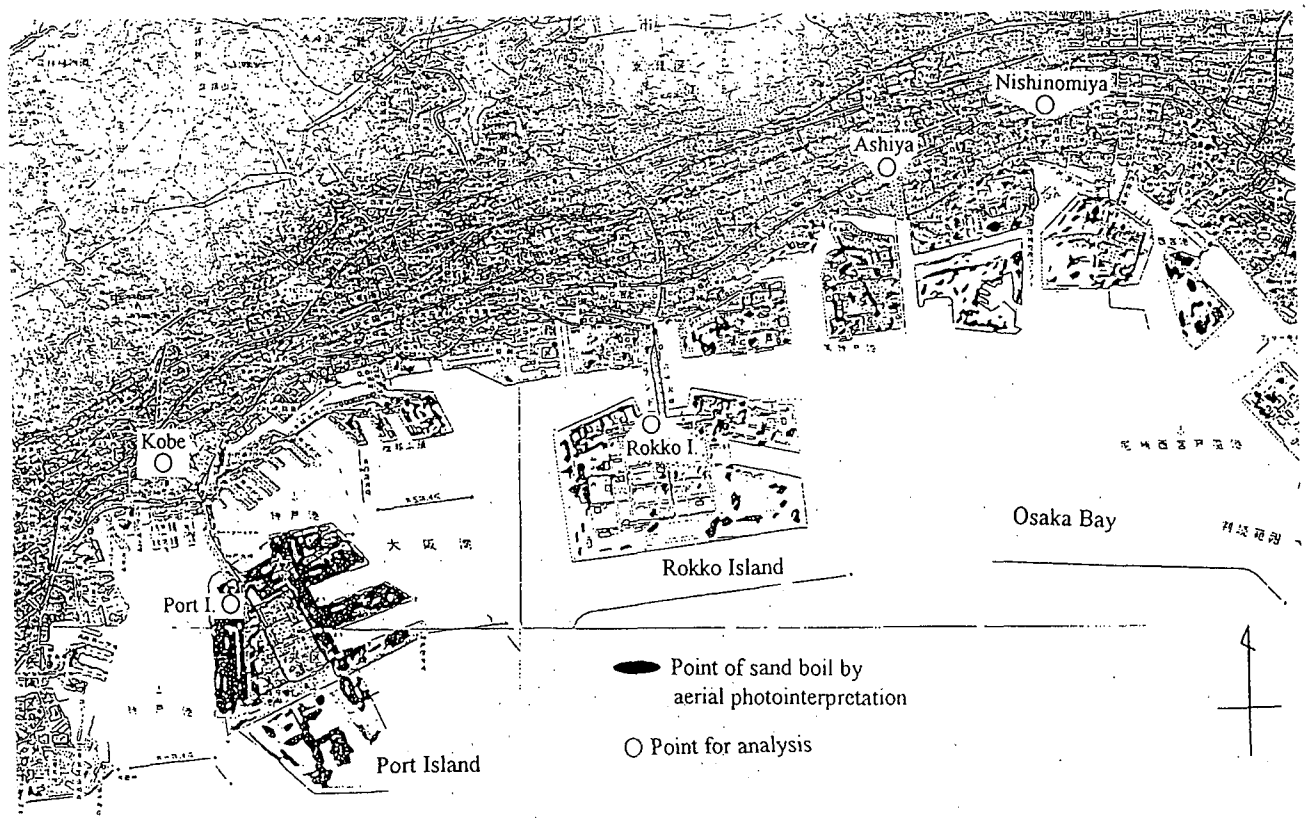


図3 神戸地域臨海部における噴砂・噴水発生地点

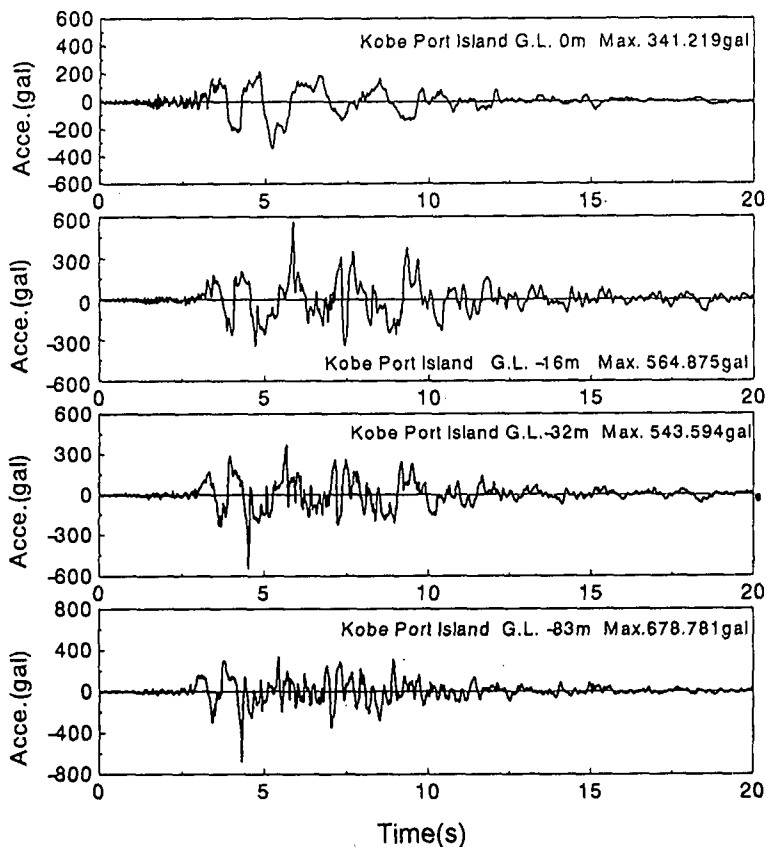
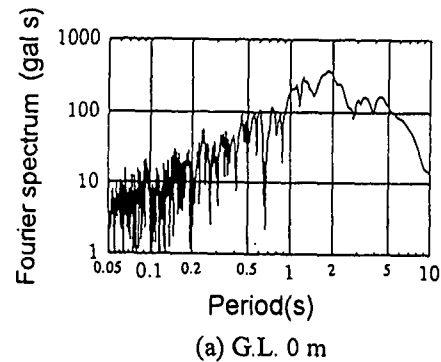
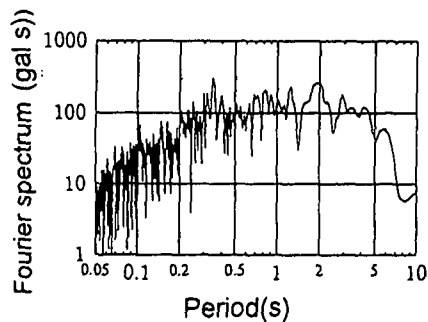


図4 ポートアイランドにおいて観測された地震加速度記録のNS成分



(a) G.L. 0 m



(b) G.L. -83 m

図5 ポートアイランド地震加速度記録のフーリエスペクトル

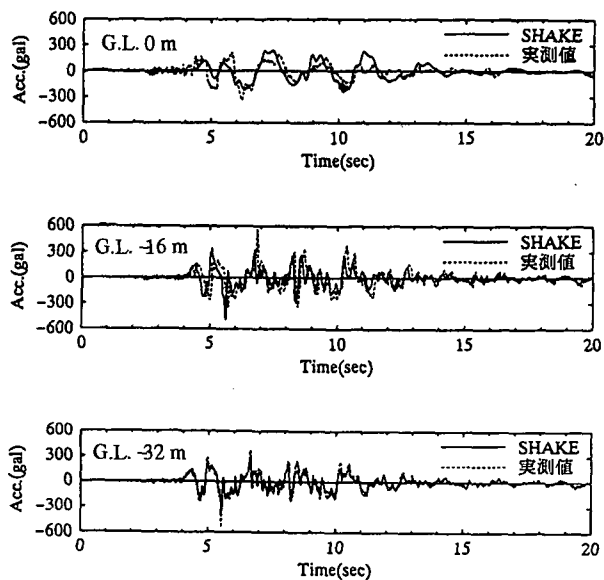


図6 「SHAKE」による地震応答解析結果 (水平加速度, NS成分)

表1 ポートアイランドにおける液状化判定の結果

| D(m) | N | σ_v | R | L | L | FL ¹ | FL | liquefied |
|------|----|------------|-------|-------|-------|-----------------|-------|-----------|
| 1 | 7 | 0.190 | 0.197 | 0.296 | 0.333 | 0.668 | 0.591 | Yes |
| 2 | 5 | 0.380 | 0.140 | 0.291 | 0.333 | 0.480 | 0.420 | Yes |
| 3 | 6 | 0.570 | 0.142 | 0.287 | 0.331 | 0.495 | 0.429 | Yes |
| 4 | 4 | 0.680 | 0.100 | 0.323 | 0.369 | 0.310 | 0.271 | Yes |
| 5 | 3 | 0.790 | 0.075 | 0.348 | 0.396 | 0.216 | 0.216 | Yes |
| 6 | 5 | 0.900 | 0.106 | 0.364 | 0.417 | 0.291 | 0.254 | Yes |
| 7 | 6 | 1.010 | 0.115 | 0.375 | 0.433 | 0.307 | 0.266 | Yes |
| 8 | 5 | 1.120 | 0.096 | 0.382 | 0.466 | 0.252 | 0.206 | Yes |
| 9 | 6 | 1.230 | 0.106 | 0.386 | 0.452 | 0.273 | 0.234 | Yes |
| 10 | 7 | 1.340 | 0.113 | 0.388 | 0.454 | 0.292 | 0.249 | Yes |
| 11 | 6 | 1.450 | 0.097 | 0.389 | 0.456 | 0.250 | 0.213 | Yes |
| 12 | 7 | 1.560 | 0.105 | 0.388 | 0.458 | 0.271 | 0.229 | Yes |
| 13 | 7 | 1.660 | 0.139 | 0.387 | 0.463 | 0.359 | 0.300 | Yes |
| 14 | 16 | 1.760 | 0.212 | 0.385 | 0.467 | 0.550 | 0.454 | Yes |
| 15 | 3 | 1.860 | 0.082 | 0.383 | 0.470 | 0.216 | 0.174 | Yes |
| 16 | 14 | 1.960 | 0.189 | 0.379 | 0.473 | 0.499 | 0.400 | Yes |
| 17 | 5 | 2.060 | 0.106 | 0.375 | 0.476 | 0.281 | 0.223 | Yes |
| 18 | 3 | 2.160 | 0.077 | 0.371 | 0.479 | 0.208 | 0.161 | Yes |
| 19 | 3 | 2.220 | 0.519 | 0.369 | 0.490 | 1.407 | 1.059 | No |
| 20 | 3 | 2.280 | 0.518 | 0.367 | 0.500 | 1.414 | 1.036 | No |

測を行った。図6はポートアイランドにおける「SHAKE」による地震応答解析結果の1例であり、上から地表面、深さ16m及び32mにおける加速度応

答の結果をそれぞれ実線で表している。また図中、点線は実測波形を示している。表1はポートアイランドにおける結果の例である。表中の F_L が液状化

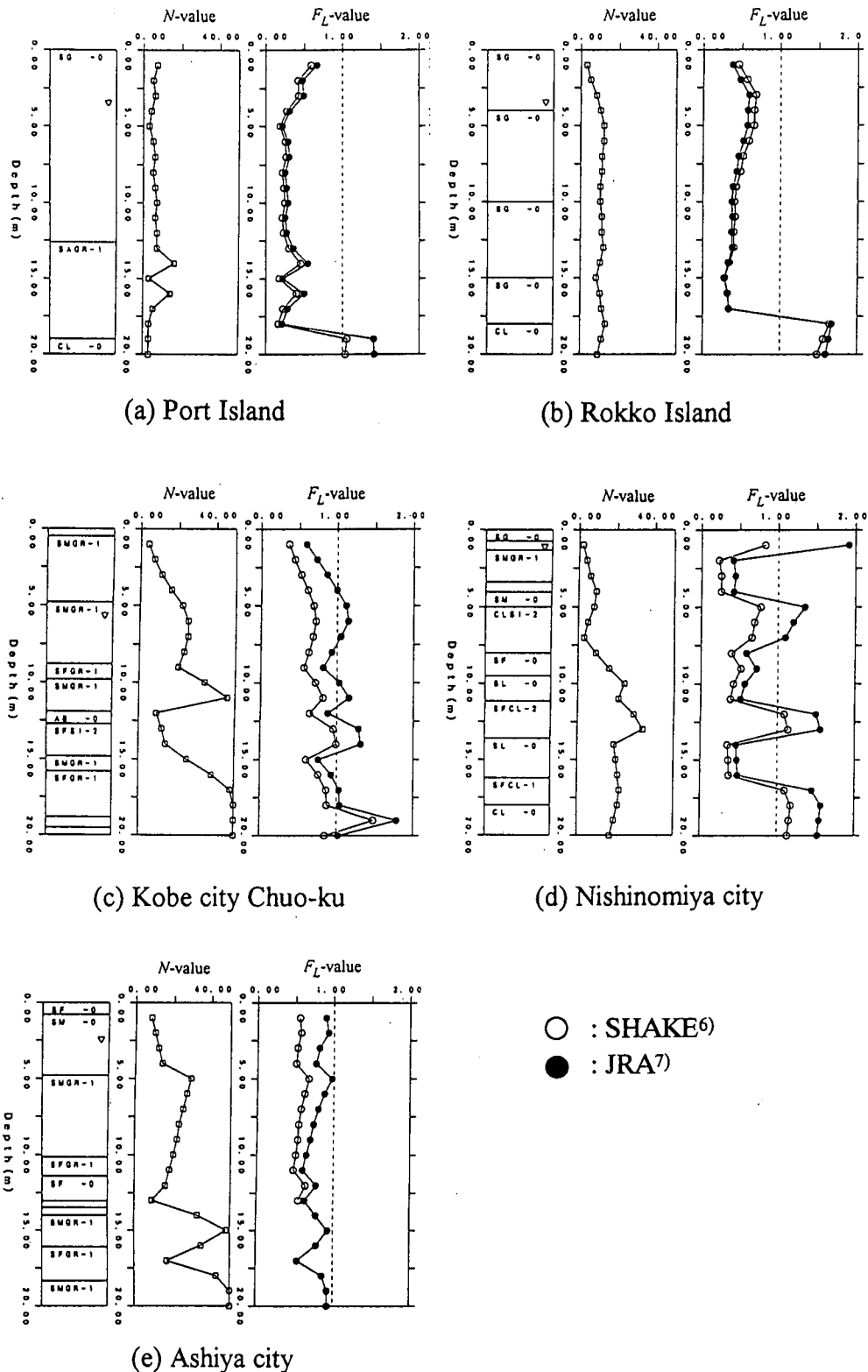


図7 解析対象地点におけるN値と液状化安全率の鉛直分布

の安全率を表しており、深さ18mまでの全層において F_L が1.0 を大きく下廻り、液状化の危険性が高い結果となっている。一方表1中の F_L は道路橋示方書による液状化の簡易判定結果であり、ここでは地震波の設計水平震度を0.3として計算している。

地震応答解析に基づく結果は、道路橋示方書の簡易判定結果よりも液状化安全率を低く評価しているが、ほぼ同程度の液状化判定結果となっている。図7は、解析対象の5地点におけるN値と F_L 値の深さ20mまでの鉛直分布を示したもので F_L 値の○印が地震

応答解析に基づく場合、●印が簡易判定の結果である。各地点とも F_L 値が 1.0 より小さくなる層が多く、液状化の危険性が高い結果となり、神戸地域の臨海部で生じた地盤の液状化を裏付けるものといえる。

5. 観測記録を用いた液状化解析

前節の地震応答解析プログラム「SHAKE」のような全応力解析でも、液状化判定法との結合によりかなりの精度で液状化予測が可能であり、図6のように実測波形をかなり再現できると考えられるが、ここでは著者らが開発している2次元有効応力解析プログラム「NUW2」¹⁰⁾を用いて、図3中のポートアイランドにおける地震観測地点を対象として液状化

解析を行った。「NUW2」¹⁰⁾は Biot の多孔質媒体理論に基づいており、井合ら¹¹⁾による構成式を用いている。入射波は前節の「SHAKE」で解析した場合と同じく、図4の深さ -32m における加速度記録（最大 543.6 gal）を用いた。図8(a),(b)はそれぞれ加速度応答と過剰間隙水圧比の時刻歴であり、地表面からの深さ4、11、17m における結果を図示している。図8(b)より各層で過剰間隙水圧比が高く、液状化が生じたために、(a)の加速度波形は地表近くではなめらかな波形となり、観測波形と同じような傾向が示されている。

ところで、原田らは、ポートアイランドにおいて液状化した地盤の沈下量を多数計測し、各種の地盤改良工法の沈下量に及ぼす効果について検討してい

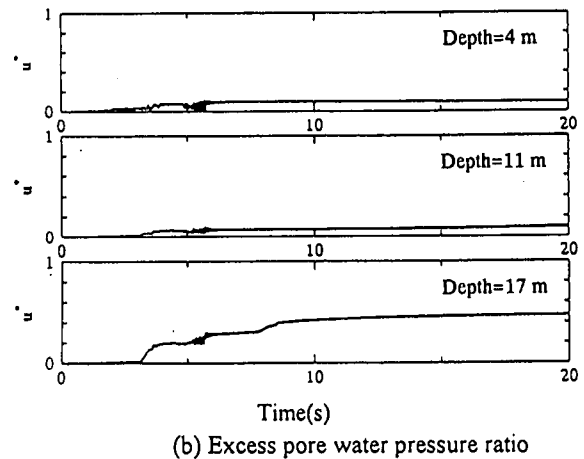
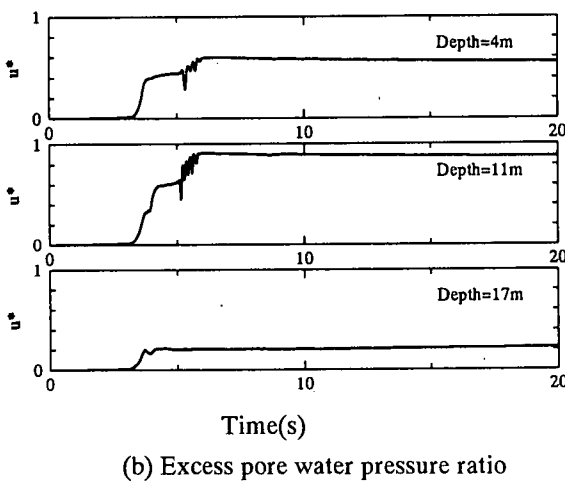
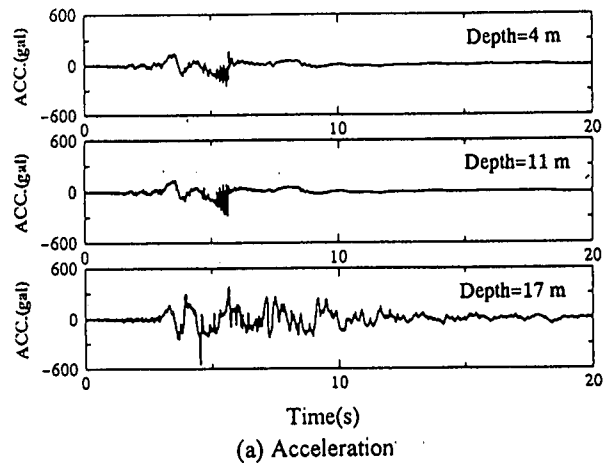
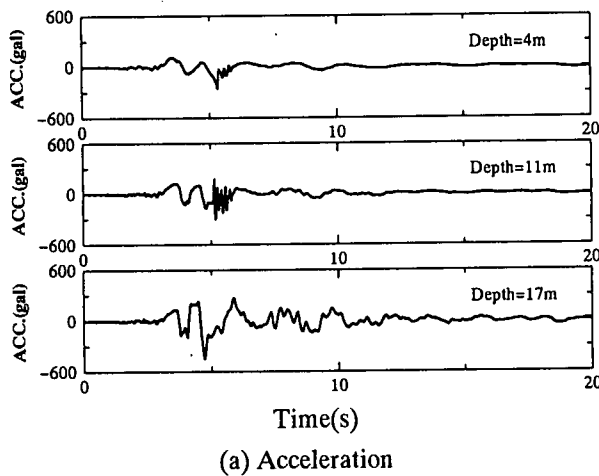


図8 液状化解析による加速度応答及び過剰間隙水圧の時刻歴（未改良地盤）

図9 液状化解析による加速度応答及び過剰間隙水圧の時刻歴（SCP改良地盤）

る¹²⁾。その結果によると、サンドコンパクションパイル工法のような振動締固めによる地盤改良は液状化時の地盤の沈下量を防止する効果が高いといえる。一方、著者らは、国内で施工実績の高いサンドコンパクションパイル工法（SCP工法）の動的締固め効果を評価するシミュレーションプログラム「WAP3」¹³⁾を開発し、上記の液状化解析プログラム「NUW2」と組み合わせてSCP改良地盤の対液状化防止効果の評価システムとして構築している¹⁴⁾。ここでは、この方法を用いて、上記のポートアイランドの観測地点を、砂杭径0.4m、締固め加振力 $6 \times 10^5 \text{N}$ 、加振振動数9.3Hz、加振時間150秒の条件でSCP改良を行った場合を想定し、SCP改良地盤に対して「NUW2」による液状化解析を行った。図9(a),(b)は改良した地盤における加速度応答及び過剰間隙水圧の時刻歴を図8と同様に図示したものである。改良地盤のN値は改良前のその数倍にまで改善されているため、過剰間隙水圧比も0.5以下に抑えられており、最大500gal以上の入力加速度に対して液状化防止に相当の効果があるといえる。

6. まとめ

阪神大震災における神戸地域の地盤災害について、臨海部埋立地を対象として地盤構造と関連づけながら2, 3の考察を行った。臨海部における被害の特徴が護岸構造物の傾斜・側方移動や橋梁基礎の水平移動などであり、地盤災害の内でも液状化に深く関係していることから、ここではまず、神戸地域の数地点を解析の対象として、「SHAKE」による地震応答解析に基づく液状化の判定を行った。その結果、臨海部での液状化の危険性を示す判定結果を得た。さらにサンドコンパクションパイル地盤改良を行った場合の液状化解析を行い、改良しない場合の液状化発生の応答解析結果に対し、SCP改良を行った場合は液状化の発生をかなり抑えることが可能なことを確認した。

参考文献

1) 日本自然災害学会：自然災害科学 阪神・淡路大

- 震災 緊急対応特集号, 1995.
- 2) 神戸大学工学部建設学科：兵庫県南部地震緊急被害調査報告書（第2報），pp.42-55, 1995.3.
 - 3) 土質工学会関西支部：「関西地盤」，1992.
 - 4) 土質工学会関西支部：「海底地盤」，1995.
 - 5) 土木学会：阪神大震災震害調査緊急報告会資料，pp.13-18, 1995.
 - 6) Schnabel, P.B., Lysmar, J. & Seed, H.B. : SHAKE. A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, EERC Report, No. EERC 72-12, 1972.
 - 7) 日本道路協会：「道路橋示方書同解説，V耐震設計編」，1990.
 - 8) 九州橋梁構造工学研究会(KABSE)耐震分科会：九州・山口地域の地盤振動特性，1993.
 - 9) 関西地震観測研究協議会：観測記録配布資料，1995.
 - 10) Akiyoshi, T., Fuchida, K., Matsumoto, H., Hyodo, T. & Fang, H.L. : Liquefaction analyses of sandy ground improved by sand compaction piles, *Int. J. Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **12**, pp.299-307, 1993.
 - 11) Iai, S., Matsunaga, Y. & Kameoka, T. : Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, JSSMFE, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
 - 12) 原田健二，安田 進，新川直利：兵庫県南部地震により液状化した地盤の沈下量と改良工法の効果に関する考察，第23回地震工学研究発表会講演概要，pp.229-232, 1995.
 - 13) Akiyoshi, T., Fuchida, K., Matsumoto, H., Fang, H.L., & Ueda, T. : Simulation of sand compaction pile method, *Proc. of the 9th Japan Earthq. Engg. Symp.*, pp.949-954, 1994.
 - 14) Akiyoshi, T., Fuchida, K., Fang, H.L., Tamaki, T., & Kato, M. : Anti-liquefaction effect of improved grounds by SCP, *Proc. of the 9th Japan Earthq. Engg. Symp.*, pp.955-960, 1994.

Liquefaction of the Ground in the Great Hanshin-Awaji Earthquake Disaster and Countermeasure Effect of SCP Method

Kunihiko Fuchida, Takashi Akiyoshi, Hidetoshi Matsumoto & Takeshi Hyodo

This paper deals with the liquefaction of the ground which occurred in the Kobe area during the Great Hanshin-Awaji Earthquake Disaster. Firstly, the liquefaction of the ground model at several points in the Kobe area, such as the reclaimed islands or near shoreline, are investigated. Then the liquefaction analyses to the observation point in the Port Island are also performed and extended to the case of the ground improvement by the sand compaction piles method. Results of the liquefaction judgement and analysis prove the high possibility of the liquefaction in the Kobe area and the SCP method is effective to prevent the liquefaction during the great earthquake such as the Hanshin-Awaji Earthquake.