

近傍改良地盤の影響を考慮した神戸ポート アイランド鉛直アレー記録のシミュレーション

藤川 智¹ ・ 福武毅芳²

¹正会員 工修 清水建設株式会社 和泉研究室 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町2-2-2)

²正会員 工博 清水建設株式会社 和泉研究室 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町2-2-2)

1995年兵庫県南部地震時に神戸市ポートアイランドで得られた鉛直アレー観測記録を有効応力解析によりシミュレーションする。地盤モデルは、鉛直アレー観測点の敷地を含む未改良域とその近傍の締固め改良域のそれぞれを表した一次元モデルと、両方の地盤領域を含んだ断面を表した二次元モデルとする。二次元モデルと一次元モデルの解析結果の比較から、近傍の改良地盤が地表面観測点の地震応答に影響を与えていることを示す。また、二次元解析結果を用いて算定される地表面の沈下量は観測値と整合する値を示す。

Key Words : Hyogoken-Nambu earthquake, vertical seismic array, soil improvement, effective stress analysis, two-dimensional

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震は、神戸市を中心に人的、及び物的に甚大な被害をもたらしたが、耐震工学上は貴重な記録も残した。神戸港の埋立地であるポートアイランドでは、表層の埋土層が完全液状化したものと考えられており、このときの鉛直アレー記録¹⁾が得られている。完全に液状化した地盤における観測記録はこれまでもあまりなく、強非線形状態での地盤応答の検討や解析コードの検証にとって重要な記録であると考えられる。このため、多くの研究者により観測記録のシミュレーション解析が実施されている^{例えは2)~12)}。これらの研究では、使用する解析コードや解析手法の違い、モデル化する地盤の深さや入力地震動の成分の違い、さらに土質パラメータの設定の根拠などに違いがある。

地盤のモデル化については、鉛直アレー最深部であるGL-83m以浅を対象としたもの^{2)~8)}や、それより浅いGL-32m以浅を対象とした検討^{9)~12)}も実施されている。解析手法については、多くの研究は有効応力解析による検討であるが、等価線形解析¹¹⁾や全応力逐次非線形解析¹²⁾による検討も実施されている。入力地震動は、水平一成分の入力による検討が多いが、多方向入力による検討も実施されている^{3)~5)7)}。

これらのうち地震後早期に実施されている研究では、地盤の動的非線形特性や液状化特性を土質種別やN値などから推定したり、凍結サンプリングによらない試料に基づいた室内試験を参考に行っているものがある。動的非線形特性や液状化特性は解析結果に大きく影響を与えるものであり、できるだけ信頼性の高い凍結サンプリングに基づいた室内要素試験結果を参考にすることが、解析結果に信頼性を与えるものと考えられる。地震後しばらくしてこのような室内試験結果も公開されており^{13),14)}、それらを用いた観測記録のシミュレーション解析も実施されている^{例えは8),12)}。

一方で、アレー観測地点の数メートル近傍では、倉庫等の基礎地盤としてロッドコンパクション工法による締固め地盤改良が行われている。この改良層の地盤物性については、阪神淡路大震災地盤調査研究会¹⁵⁾(以下、地盤調査研究会と略称)により土質試験が実施され、結果が詳細に公開されている。また、このデータを用いた有効応力解析¹⁰⁾も実施され、改良層の液状化の程度の推測や未改良地盤と改良地盤の応答の違いなどが検討されている。

以上のような既往の研究による未改良地盤のシミュレーション、及び改良地盤の地震応答解析は、いずれも水平成層地盤を仮定した一次元モデルによる

ものである。しかし、上述のようにアレー観測地点の敷地に隣接して改良埋土地盤が存在し、このローカルな不整形性が観測記録に影響を与えている可能性は否定できない。従って、この改良層が観測記録に与える影響の有無を明らかにしなければ、従来から行われている観測記録のシミュレーションの精度やその結果を使った被害考察の信頼度を推し量ることもできないと考えられる。また、表層の改良層の有無が、強震時における地盤の地震応答に与える影響を明らかにしておくことは、埋立地の液状化対策として地盤改良を設計する際の重要な情報となるものと考えられる。これまで、このような改良地盤の挙動やそれが周辺地盤に与える影響を多次元地盤モデルの解析により検討したものは多くない。藤川ほか¹⁶⁾は、ポートアイランドの鉛直アレー地点近傍の改良埋土地盤が観測記録に与える影響を、二次元断面の地盤モデルを用いた有効応力解析により検討している。地盤はアレー最深部であるGL-83mまでモデル化している。入力波は観測記録の水平強軸成分を用いており、これにより水平二成分入力の影響を近似的に考慮している。解析の結果、二次元モデルでは改良層と未改良層が互いに影響を及ぼし、一次元モデルとは異なる応答を示すことを示している。その後、同様の検討をYoshida¹⁷⁾も実施しており、二次元解析では改良層と未改良層の相互作用が生じ、一次元解析とは異なる応答になることと、その影響は液状化後に顕著であることを示している。しかし、二次元解析の結果と観測記録との比較は行われていない。用いられた地盤モデルはGL-32mまでであり、入力波はEW成分のみを用いており水平二成分入力の影響は考慮されていない。一方、Yashima et al.¹⁸⁾は、サンドドレン工法による改良地盤の液状化抑制効果を三次元有効応力解析により検討している。しかし、ポートアイランド全体をモデル化してそのマクロな挙動を検討しており、改良層が観測記録に与える影響については検討していない。

本論文では、上述の藤川ほか¹⁶⁾の解析で用いられた地盤モデルや地盤物性を見直して再検討し、さらに追加検討を行う。まず、地盤の動的非線形特性および液状化特性に関する既往の室内試験の中から、比較的信頼性が高いと考えられるものを選び出す。それらを用いて、未改良地盤と改良地盤の一次元モデルの有効応力解析を行い、改良層が地盤地震応答に与える影響を検討する。次に、未改良層と改良層を含む二次元断面をモデル化して観測記録のシミュレーション解析を実施し、この結果と一次元地盤モデルの解析結果との比較から、近傍の改良層が観測記録へ与える影響を検討する。さらに、二次元地盤モデル

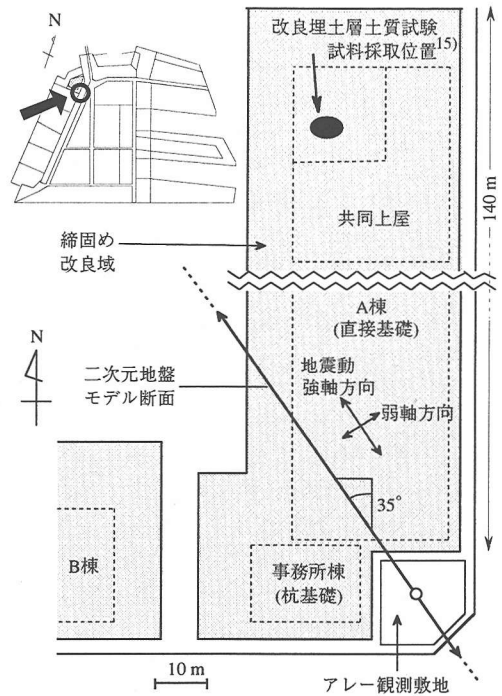


図-1 ポートアイランドアレー観測地点、および二次元地盤モデルの断面

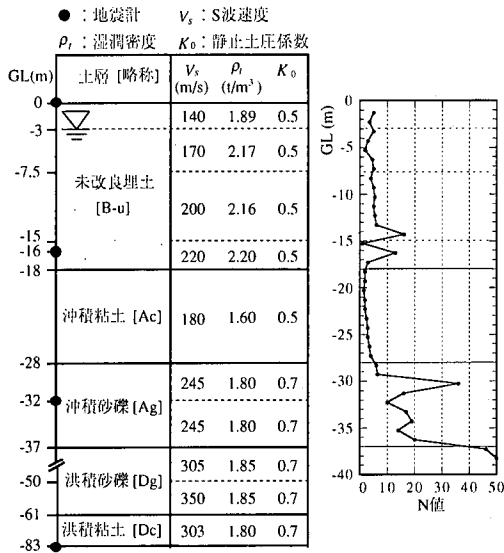
の解析結果から既往の簡易式を用いて鉛直断面の沈下量を算出し、各断面位置ごとの沈下量の差異を検討する。また、この結果と観測値との比較も行う。

2. 対象地点と地盤条件

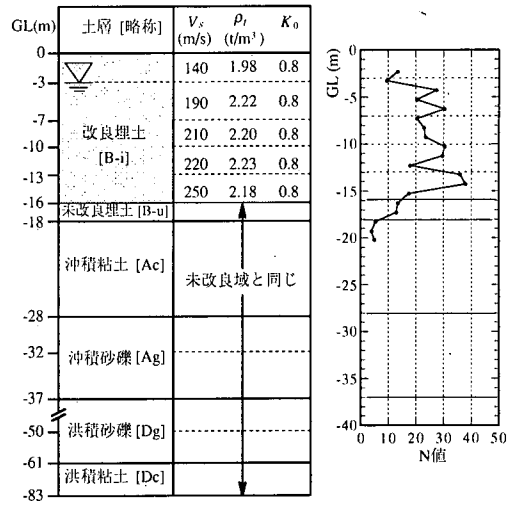
(1) 対象地点と地盤構成

対象とするのは、神戸市のポートアイランドの北西に位置する鉛直アレー観測地点とその周辺地盤である。図-1に観測地点周辺の概略図を示す。アレー観測地点は杭基礎の事務所棟と直接基礎の倉庫を支持するロッドコンパクション工法による改良地盤に二面を囲まれる位置にあり、地表面のアレー観測計器位置から改良層端部までの水平距離は数m～10m程度である。

図-2にはアレー観測地点近傍の未改良域と改良域の地層構成と N 値、及びその他の物性を示す^{15),19)}。改良域の N 値は改良砂杭間の平均値である。未改良域ではGL0～-18mまでがマサ土による埋土層(以下、B-u層)である。改良域では、この埋土層のGL0～-16mまでが締固め改良層(以下、B-i層)となっている¹⁵⁾。ここで特徴的なのは、GL-16～-18mが改良さ



(1) 未改良域 (アレー観測点敷地)



(2) 改良域

図-2 地層構成と地盤物性

れず薄い未改良層として残されていることである。これは、この層の N 値がやや大きく液状化の可能性が小さいと判断されたためであると考えられる。地下水位は文献15)を基にGL-3.0mとする。GL-32m以浅におけるS波速度 V_s 、湿潤密度 ρ_t 、静止土圧係数 K_0 については、土質試験結果が詳細に示されている文献15)の値を適用する。そのうち、未改良層については文献15)の未改良域を対象とした解析で使用されている値を適用する。文献15)で実施されているB-i層の土質試験試料の採取位置は、アレー観測点近傍の改良域よりやや北側(図-1参照)であるが、ここでは改良域全体を同じ土質と見なしてこの試験結果を準用する。文献15)ではGL-32m以深の物性は示されていない。このため、GL-32m以深については、 V_s は神戸市開発局¹⁹⁾が実施したPS検層結果を適用し、 K_0 は0.7とし、 ρ_t は土質に応じた標準的な値とする。図-2に示す V_s の値は各層の中心深さのものとし、解析では拘束圧依存性($V_s \propto \sigma_m^{0.25}$ 、 σ_m は平均有効拘束圧)を考慮する。つまり、同じ土層内でも地盤モデルの要素毎に V_s 値が異なる。

(2) 動的非線形特性と液状化特性

液状化を考慮するため解析は有効応力解析とし、過剰間隙水圧はB-u層、B-i層、および沖積砂礫層(Ag層)で考慮する。他の層では過剰間隙水圧は考慮せず応力とひずみの関係の非線形性のみを考慮する。土の構成式のパラメータの設定においては、以下に述べるように既往の室内要素試験データの中から比較的信頼性が高いと考えられるものを参考にする。こ

こで言う信頼性の基準としては、試験条件が詳細に開示されているものとし、その中で凍結サンプリング試料のように供試体の乱れが少ないものを重視する。

ポートアイランドの地盤に対する主な既往の動的変形試験^{13),15),19)}($G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 関係)を表-1に示す。B-u層の $G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 関係としては、善・山崎¹³⁾による試験結果を用いる。これは、凍結試料を用いていることと、供試体の径が30cmと大きく礫分の多いマサ土の性質を比較的よくとらえているものと考えられるためである。B-u層より深い各層は、神戸市開発局¹⁹⁾の試験結果を用いる。B-i層については地盤調査研究会¹⁵⁾の凍結試料による試験結果を用いる。図-3には各層の $G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 関係の実験値をプロットで示す。

次に、主な既往の非排水繰返し試験^{13)~15),19)~20)}(液状化試験)を表-2に示す。B-u層についての試験で、凍結サンプリングによる試料を用いているのは、善・山崎¹³⁾と内田ほか¹⁴⁾の試験である。著者らが以前に実施したポートアイランド観測記録の二次元シミュレーション解析¹⁶⁾では、B-u層については善・山崎の結果を用いたが、ここではその設定を見直し内田ほかの試験結果を用いる。これは、善・山崎のB-u層の試験結果がB-i層の結果とあまり差異がないことと、内田らの試験結果が当該地点に近い位置でサンプリングされていることを考慮するためである。B-i層については地盤調査研究会¹⁵⁾の凍結試料による試験結果を用いる。Ag層については神戸市開発局¹⁹⁾の試験結果を用いる。図-4には液状化強度と繰返し回数関

表一 ポートアイランド地盤に対する既往の動的変形試験

| 著者または機関 | 対象土層 [略称] | サンプリング方法 | 供試体寸法 (cm) | 試験方法 |
|--------------|-------------|----------|-------------|-------|
| 神戸市開発局,1995 | 沖積粘土 [Ac] | シンウォール | 内径3,外径7,高さ7 | 中空ねじり |
| 〃 | 沖積砂礫 [Ag] | トリプルチューブ | 〃 | 〃 |
| 〃 | 洪積砂礫 [Dg] | 〃 | 〃 | 〃 |
| 〃 | 洪積粘土 [Dc] | デニソントューブ | 〃 | 〃 |
| 善・山崎,1996 | 未改良埋土 [B-u] | 凍結 | 径30,高さ60 | 非排水三軸 |
| 地盤調査研究会,1998 | 改良埋土 [B-i] | 凍結 | 径15,高さ30 | 非排水三軸 |

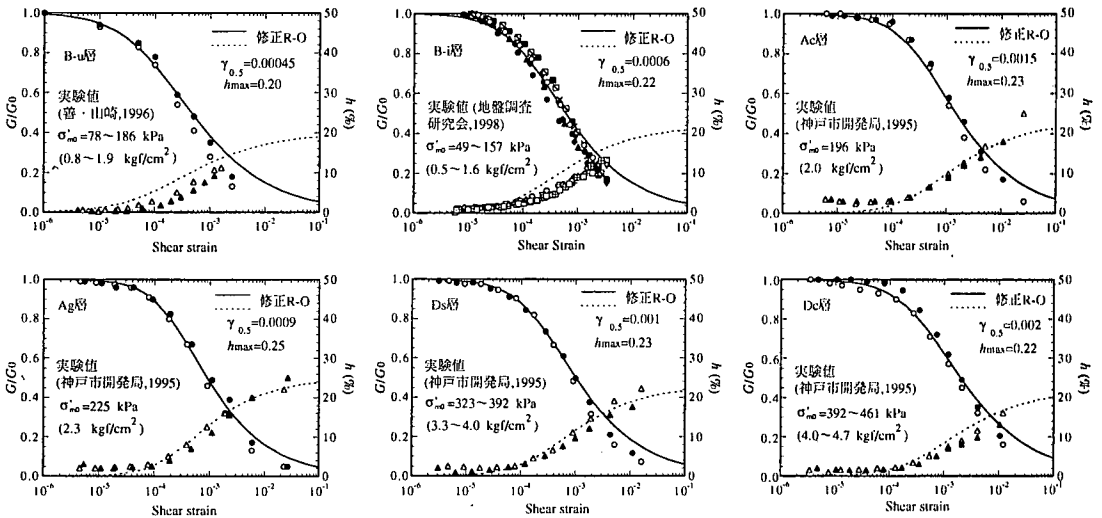


図-3 セン断剛性比 G/G_0 と履歴減衰定数 h のせん断ひずみ依存特性

表二 ポートアイランド地盤に対する既往の非排水繰返し試験 (液状化試験)

| 著者または機関 | 対象土層 [略称] | サンプリング方法 | 供試体寸法 (cm) | 試験方法 |
|--------------|-------------|----------|------------|------|
| 神戸市開発局,1995 | 未改良埋土 [B-u] | シンウォール | 径7.5,高さ15 | 三軸 |
| 〃 | 沖積砂礫 [Ag] | トリプルチューブ | 径5,高さ10 | 〃 |
| 永瀬ほか,1995 | 未改良埋土 [B-u] | シンウォール | 径7.5,高さ15 | 三軸 |
| 善・山崎,1996 | 未改良埋土 [B-u] | 凍結 | 径30,高さ60 | 三軸 |
| 内田ほか,1997 | 未改良埋土 [B-u] | 凍結 | 径15,高さ30 | 三軸 |
| 地盤調査研究会,1998 | 改良埋土 [B-i] | 凍結 | 径15,高さ30 | 三軸 |

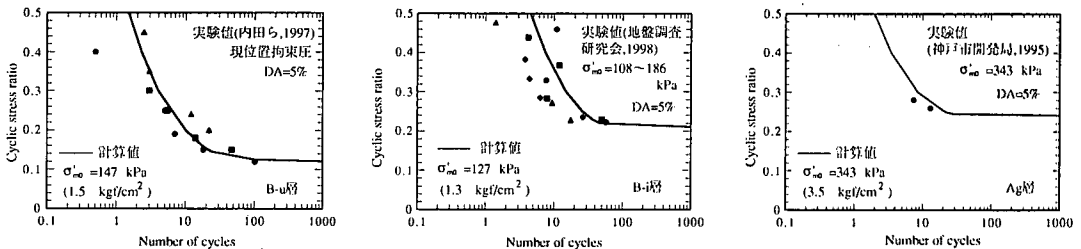


図-4 液状化強度と繰返し回数関係

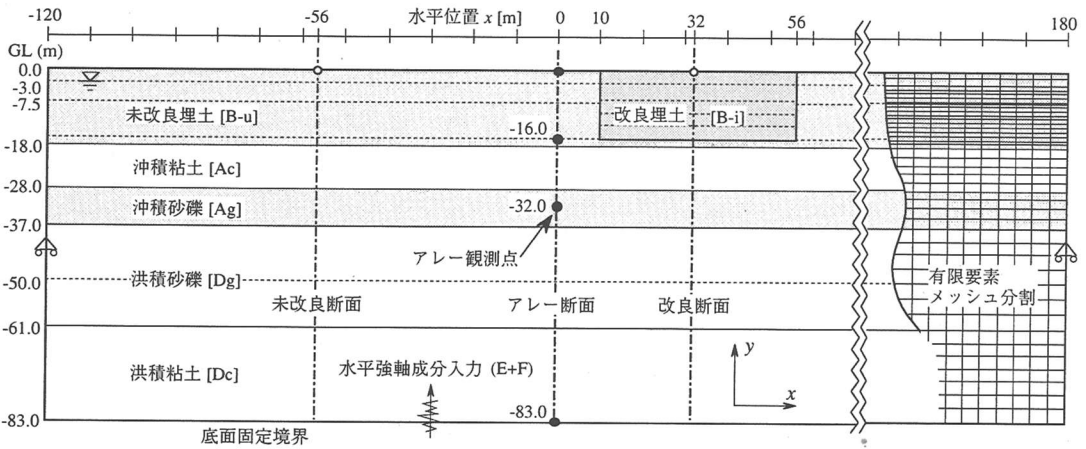


図-6 二次元地盤モデル

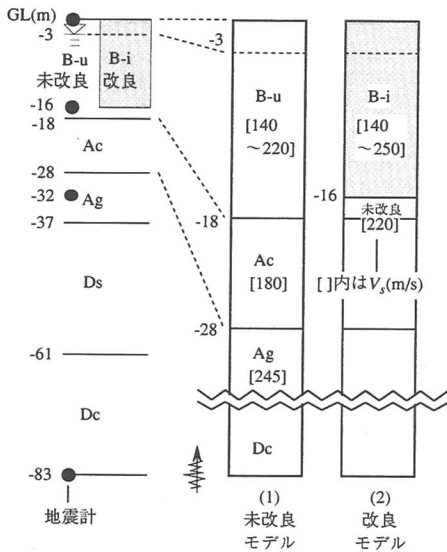


図-5 一次元地盤モデル

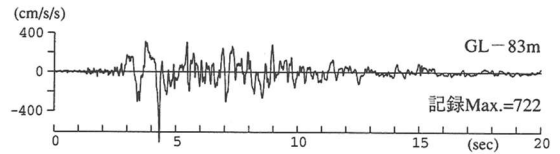


図-7 GL-83mの観測記録水平強軸成分（入力波）

係の実験値をプロットで示す。

3. 地盤モデルと解析条件

解析対象とする地盤モデルは、地盤を一次元成層状態と仮定した一次元モデルと、改良層と未改良層を含んだ二次元断面を対象とした二次元モデルとする。図-5に一次元モデル（以下、1Dモデル）を示す。1Dモデルは、埋土層が改良されていないアレー観測点を含んだ未改良域の地盤を対象とした地盤モデル（1D未改良モデル）と、その近傍で埋土層が改良された改良域を対象とした地盤モデル（1D改良モ

デル）とする。一次元モデルの有限要素メッシュの分割は、B-u層とB-i層では0.5～1.5m間隔、Ac層以深では2.0～4.0m間隔とする。

二次元地盤モデル（以下、2Dモデル）は、図-1に示すように地震動の水平成分の強軸方向（N35°W）²¹⁾の断面でモデル化する。同図に示すように、アレー観測敷地の西側には杭基礎の事務所棟もあり、実際には三次元的な地形効果があると考えられるが、近似的に二次元断面の一方入力で検討する。図-6に2Dモデルを示す。鉛直アレー観測点は4点あり、これらは深度により水平方向の位置が多少異なるが、ここでは近似的に観測敷地（17m×17m程度）の中央にあるものと仮定し、改良体から10mの距離の節点を観測点と対応させて記録との比較を行う。境界条件は、側方は水平ローラーとし、底面は固定条件とする。有限要素メッシュの水平方向の分割は2.0～4.0m間隔とし、深さ方向の分割は1Dモデルと一致させる。図-6の右側方に有限要素メッシュ分割の一部を示す。なお、2Dモデルは著者らが以前実施した二次元シミュレーション解析¹⁶⁾で用いたものを修正し、側方の領域を十分広くしている。これは、側方境界からの反射波の影響をできるだけ少なくするためである。

2Dモデルの初期有効応力は、1Dモデルと同じ値を直接用いる。つまり、未改良域では未改良1Dモデル

の初期応力を用い、改良域では改良1Dモデルの初期応力を用いる。このため、未改良層と改良層の K_0 値の違いから初期の応力状態は不釣り合いとなり、一般的には運動方程式中の初期の不釣り合い力により衝撃力が生じることが懸念される。しかし、本検討で用いる解析手法では、構成式のパラメータには初期有効応力を反映させているが、運動方程式中では初期不釣り合い力は考慮していない。この結果、上述のような衝撃力の発生は回避されている。

入力地震波にはGL-83mの観測記録を用いる(いわゆるE+F入力)が、水平二成分(NS, EW)を強軸と弱軸の二成分に変換した波形の内、強軸成分のみを用いる。これは、強軸成分が卓越する地震動では、強軸成分のみの入力と水平二成分同時入力とで液状化の発生に及ぼす影響はあまり変わらないという既往の研究結果^{4),22)}に基づいている。これにより、水平二成分入力の影響が近似的に考慮されるものと考えられる。図-7に入力波とするGL-83mにおける水平強軸成分加速度波形を示す。

解析には二次元有効応力解析コードALiSS^{23),24)}を用いる。土の構成式には、せん断応力-せん断ひずみ関係を表す修正R-Oモデルとせん断ひずみ-ダイレイタンシー関係を表すBowlモデル²⁴⁾を併用し、非排水条件を課すことにより過剰間隙水圧を算定している。図-3には、修正R-Oモデルによる $G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$ 関係を曲線で示す。同図中には、試験時の拘束圧(幅がある場合にはその平均値)に対応する基準ひずみ $\gamma_{0.5}$ ($G/G_0=0.5$ に対応するせん断ひずみ)と、最大減衰定数 h_{max} を示す。解析では基準ひずみ $\gamma_{0.5}$ は平均有効拘束圧の0.5乗に比例させる。図-4には修正R-OモデルとBowlモデルを用いた要素シミュレーションによる液状化強度曲線を実線で示す。実験値に計算値をフィッティングさせる際には、試験データの平均的な値を通るように設定する。

解析における時間領域の数値積分はNewmark- β 法を用い、時間刻みは0.002秒とする。非線形収束計算は初期剛性法(修正Newton-Raphson法)を用いる。数値誤差により生ずる加速度のパルス状高振動数成分を除去するために、非常に小さい剛性比例型のレイリー減衰($\alpha=0, \beta=0.001$)を与える。これらの解析条件は各地盤モデルで共通とする。

4. 解析結果

(1) 一次元モデルの解析

図-8に地表面観測記録と1D未改良モデルに対する解析の地表面加速度時刻歴を示す。最大値とその

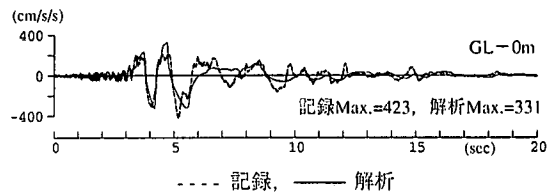


図-8 加速度時刻歴 (1D未改良モデル)

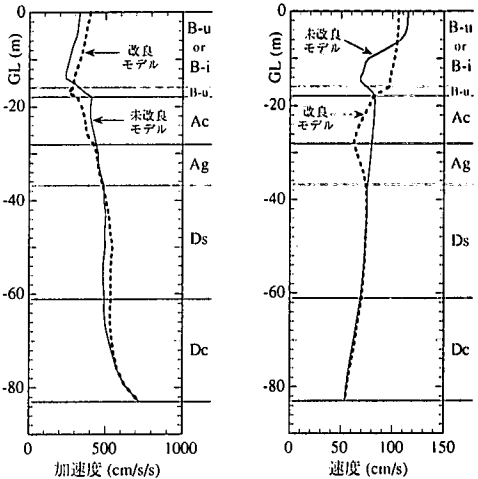


図-9 加速度、速度の最大値分布 (1Dモデル)

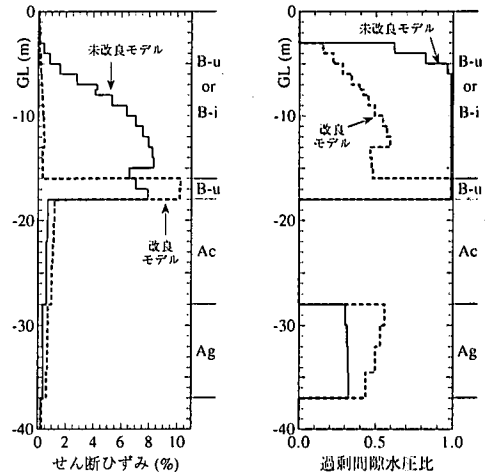


図-10 せん断ひずみ、過剰間隙水圧比の最大値分布 (1Dモデル)

発生時刻はやや異なるが、主要動の2波目までの波形は良く再現できている。6秒以降では、液状化による長周期化および振幅の低減が再現できているが、記録に比べやや振幅が小さくなっている。

図-9には加速度と速度の最大値深度分布を示す。また、図-10にはせん断ひずみ γ_y と過剰間隙水圧比 $(\sigma'_m - \sigma'_{m0})/\sigma'_{m0}$ (σ'_{m0} は初期平均有効拘束圧、 σ'_m は平均

有効拘束圧)の最大値の深度分布を示す。1D未改良モデルのB-u層では、ごく表層を除いて過剰間隙水圧比が1.0まで上昇して完全液状化し、せん断ひずみの最大値は8%程度に達している。このため、B-u層下部で加速度振幅が大きく低減し、地表面にかけての増幅も小さい。速度分布については、B-u層下部で振幅低減が見られるが、B-u層上部では大きく増幅している。なお、B-u層で生じている最大せん断ひずみは大きく、図-3に示す動的変形試験の実験値の範囲外である。しかし、数%レベルのひずみにおける応力-ひずみ関係は、図-4に示す非排水繰返し試験の実験値に、構成式から得られる液状化強度曲線を一致させることで保証されているものと考えられる。

一方、1D改良モデルの解析結果は、B-i層(GL0~-16m)のせん断ひずみが1%以下と小さく、過剰間隙水圧比は0.5程度であり液状化には至っていない。しかし、改良層下に残されたB-u層(GL-16~-18m)が液状化して非常に大きなせん断ひずみが生じている。さらに、1D未改良モデルに比べ沖積粘土層(Ac層)と沖積砂礫層(Ag層)のせん断ひずみがやや大きく、Ag層では過剰間隙水圧の上昇もやや大きい。GL-16m以浅の改良層の存在が、それより深部の地盤応答に影響している。地表面近くの表層の最大加速度はB-u層が完全液状化している1D未改良モデルの方が1D改良モデルより小さい。しかし、最大速度はB-u層上部の大きな増幅のため1D未改良モデルの方が大きい。

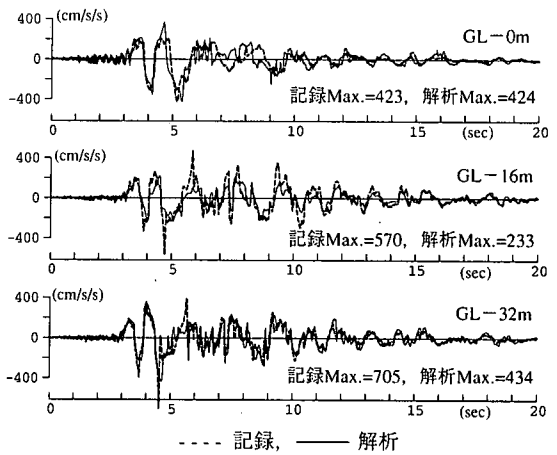


図-11 加速度時刻歴(2Dモデル)

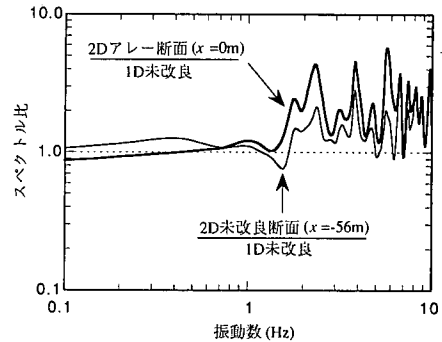


図-12 地表面加速度波形のスペクトル比(解析結果)

(2) 二次元地盤モデルの解析

a) 加速度、速度

図-11には、アレー観測点の各深度の加速度記録と2Dモデルの加速度時刻歴を示す。解析結果は図-6に示すアレー断面($x=0m$)の各深度の加速度波形である。地表面(GL-0m)の波形は、図-8に示す1D未改良モデルに比べ短周期成分が目立っている。これは、図-12に示す2Dモデルのアレー断面($x=0m$)と1D未改良モデルの地表面加速度波形のスペクトル比から、1.5Hz以上の成分によるものであることが分かる。これは、主として未改良層と改良層の二次元的な複雑な相互作用により生じた成分であると考えられる。なお、埋土層全層を未改良とした2Dモデルでは、上述のような短周期成分が発生しないことを確認している。また、1D未改良モデルの波形に比べ、5秒過ぎのピークの発生時刻は記録波形に近く、6秒以降の振幅も記録との対応がよりよくなっている。このように、地表面加速度波形の比較からは、成層状態を仮定した1D未改良モデルより改良層の影響を考慮した2Dモデルの方が記録との対応

がよい。これより、少なくとも地表面観測記録には近傍の改良層の影響が含まれている可能性が指摘できる。GL-16mとGL-32mでは、最大振幅を示すピークが解析では再現されておらず最大値を過小評価している。しかし、波形全体の傾向はよく再現されているため、地中の加速度最大値の一致が良くないことによる他の応答結果への影響は大きくないものと考えられる。

図-13に地表面における水平加速度の最大値分布を示す。2Dモデルの結果は改良域を中心にほぼ左右対称であるため、改良域右端($x=56m$)から左側の領域のみを示している。同図には、観測記録の最大値をプロットで示し、1Dモデルの結果も示している。先述のように1Dモデルでは、未改良層の液状化により地表面加速度の増幅が抑制されたため、改良域の方が最大値がやや大きい。これに対し、2Dモデルでは改良域より未改良域の方がむしろ大きい傾向が見られる。このため、1Dモデルと2Dモデルを比較すると、改良域ではほぼ同程度の値であるが、未改良域では2Dモデルの方が大きな最大加速度を示す。これは、

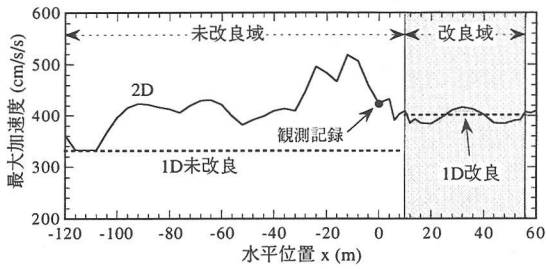


図-13 地表面加速度の最大値分布

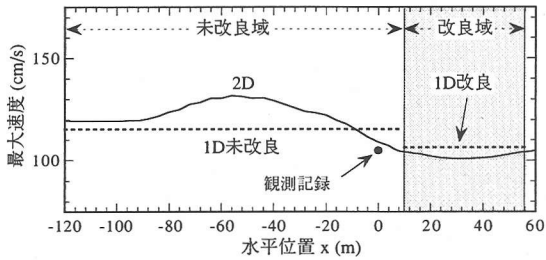
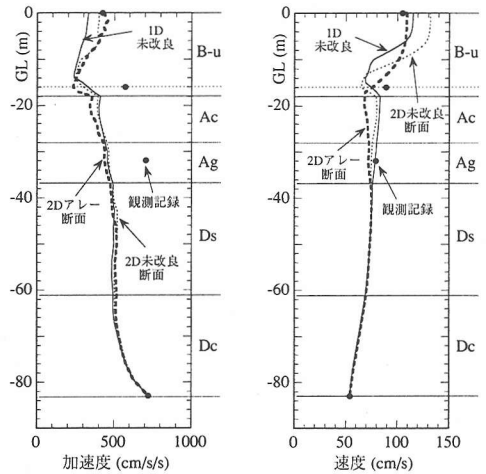


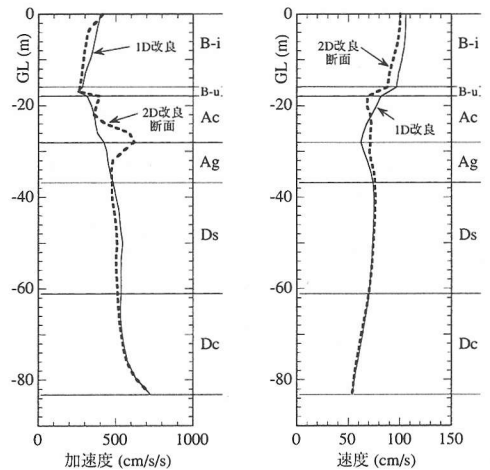
図-14 地表面速度の最大値分布

図-12のスペクトル比に見られる1.5Hz以上の短周期成分によるものであり、この成分が未改良層と改良層の境界($x=10\text{m}$)から剛性がやや小さい未改良層の方向へ伝播するためであると考えられる。これは、同図のスペクトル比で、アレー断面($x=0\text{m}$)と未改良域中央部の未改良断面($x=-56\text{m}$)の短周期成分の振幅の比較から、境界($x=10\text{m}$)から離れた未改良断面の方が短周期成分の振幅が小さくなっていることからわかる。観測記録との比較を行うと、2Dモデルの結果は観測値と非常に対応がよく、近傍の改良層の影響を受けたアレー観測点の応答を精度よく再現している。

同様に、図-14には2Dモデルの地表面水平速度の最大値分布と1Dモデルの地表面速度の最大値、及び地表面観測記録の最大速度を示す。2Dモデルでは改良域は未改良域より最大速度がやや小さく、これは1Dモデルの結果と同様の傾向である。改良域と未改良域の境界($x=10\text{m}$)に近い未改良域では、未改良域中央付近より小さい。これは、改良層近傍の未改良層が改良層による変形拘束効果を受けていることが一因と考えられる。観測記録と解析結果を比較すると、1D未改良モデルの結果はやや過大評価となっているが、2Dモデルの結果は観測記録と非常に良く対応している。図-13と図-14の側方地盤の応答値は、側方境界に近づくにつれて1D未改良モデルの値にはほぼ収束している。これより、側方境界における反射波の影響は小さいと考えられる。



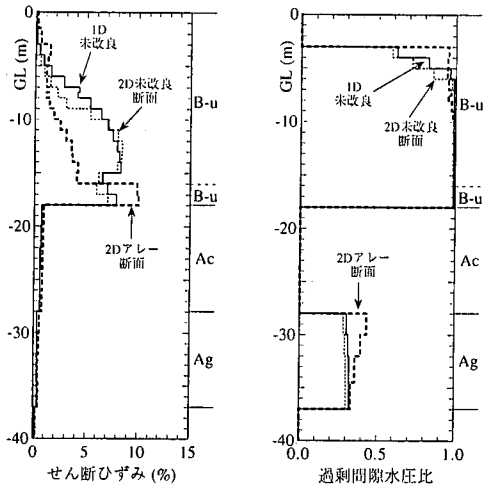
(1) 未改良域の断面



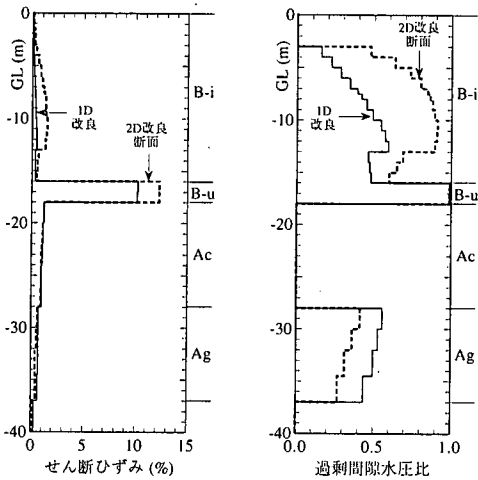
(2) 改良域の断面

図-15 加速度、速度の最大値分布

図-15には加速度、及び速度の最大値の深度分布を示す。2Dモデルの出力断面は図-6に示すように、アレー観測地点に対応する断面(以下、2Dアレー断面($x=0\text{m}$))と改良域から離れた未改良域の断面(以下、2D未改良断面($x=-56\text{m}$))、および改良域中央の断面(以下、2D改良断面($x=32\text{m}$))の3断面である。2D未改良断面と2Dアレー断面の最大加速度の深度分布に大きな差は見られないが、地表付近でやや異なる。1D未改良モデルは、GL-16m以浅のB-u層において2D未改良モデルに比べやや小さいが、それ以深では同程度の値を示している。速度分布については、1D未改良モデルと2D未改良断面は、B-u層で大きく増幅しているが、改良層近傍の2Dアレー断面では表層の増幅がこれらに比べやや抑えられている。これ



(1) 未改良域の断面



(2) 改良域の断面

図-16 セン断ひずみ、過剰間隙水圧比の最大値分布

は改良層による拘束効果によるものであると考えられる。次に観測記録との比較を行うと、加速度最大値については解析モデルや断面によらず、GL-16mとGL-32mで解析結果が過小評価となっている。これは、地中ではパルス状の短周期成分で加速度最大値が決まっているためであるが、解析ではこのような短周期成分までは正確に再現できていない。最大速度については記録との対応は概ねよく、地表面では2Dアレー断面の結果が記録とよく対応している。次に、1D改良モデルと2D改良断面を比較すると、最大値はやや異なるが分布傾向に大きな違いは見られない。

b) 地盤のせん断ひずみ、過剰間隙水圧比

図-16にはGL-40m以浅におけるせん断ひずみと過剰間隙水圧比の最大値分布を示す。1D未改良モデル

と2D未改良断面のせん断ひずみと過剰間隙水圧比の分布は同様の傾向を示しており、せん断ひずみはB-u層下部付近で8%程度に達し、過剰間隙水圧比はB-u層のごく表層を除き1.0まで上昇し完全に液状化している。これに対し、2Dアレー断面のせん断ひずみは、地表面からGL-16mまでは2D未改良断面の半分程度である。これは、2Dアレー断面が改良層の近傍であるため、その変形拘束効果によりせん断ひずみが抑制されているからである。一方、2D改良断面では、地表面からGL-16mまでのB-i層ではせん断ひずみが小さく、過剰間隙水圧比は1.0に達しておらず液状化していない。しかし、GL-16～-18mのB-i層の下に残されたB-u層では、剛性が比較的大きいB-i層の下にあるため、非常に大きなせん断ひずみが生じ液状化している。2Dアレー断面のGL-16～-18mでは、これに引きずられてやや大きなせん断ひずみが生じている。B-i層のせん断ひずみと過剰間隙水圧比は、1D改良モデルに比べ2D改良断面の方が大きいですが、これは液状化した未改良域との相互作用など二次的な挙動によるものと考えられる。未改良域では、B-u層のせん断ひずみに対してAc層とAg層のせん断ひずみは小さい。Ag層の過剰間隙水圧比は、1Dモデル、2Dモデルともに0.3～0.4程度であり、別地点ではあるが地震後に観測された値(0.5程度)¹⁹⁾よりやや小さいが対応する値となっている。Ag層では未改良断面と改良断面はやや異なり、過剰間隙水圧比は改良断面の方がやや大きく、表層のB-i層の存在が深部地盤の応答に影響を与えていることが分かる。

c) 地表面沈下量の算定

兵庫県南部地震時のポートアイランドでは、埋土層の液状化に起因した地表面沈下が生じた。地震前後の調査から、各地点ごとの地表面沈下量が測定されている。埋土層が未改良である地点の沈下量の平均値は40～50cm^{25),26)}と報告されている。一方、本検討で対象としている改良域で測定された沈下量は8～14cm¹⁵⁾であり、未改良域に比べ沈下が大きく抑制されている。ここで、二次元モデルの解析結果を用いて各断面の沈下量を推定し、断面位置による沈下の差異を把握し、さらに実測値との比較を行う。沈下量の算定には、Shamoto and Zhang²⁷⁾の方法を用いる。これは、地震により地盤に生じた最大せん断ひずみから、液状化後の一次元的な鉛直方向の沈下量を推定する手法である。従って、二次元的な沈下分布を同時に算定するものではないが、各断面の沈下量の第一近似として評価を行う。

計算はまず、対象地盤のN値や細粒分含有率 F_c から、既往の経験式^{28),29)}に従って初期間隙比 e_0 、および

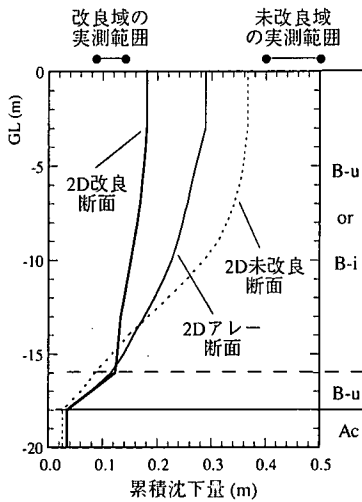


図-17 地盤沈下量

最小間隙比 e_{\min}^* ($D_r=130\%$ のときの間隙比) を算定する。次に、解析で得られた鉛直断面の各要素の最大せん断ひずみ $\gamma_{\max,j}$ を用いて式(1)から沈下量 D_s を算定する。式(1)で n は鉛直断面の全層数 (要素数), Δz_j は層厚, j は層番号を示す。

$$D_s = 2 \sum_{j=1}^n \left(\frac{e_0 - e_{\min}^*}{1 + e_0} \right) (\gamma_{\max,j})^{0.76} \Delta z_j \quad (1)$$

液状化による沈下が生じる層としては、過剰間隙水圧の上昇を考慮したB-u層、B-i層、Ag層と仮定する。これらの層の N 値は図-2に示す値を用いる。改良断面の沈下計算時のAg層の N 値は未改良域と同じ値を用いる。また、 F_c は文献(15)、(19)を参考に平均的な値として一律に10%を与える。

図-17は計算結果であり、Ag層下端 (GL-37m) を基準として、それより上層の各要素の沈下量の累積値を示している。従って、同図のGL-18mの沈下はAg層 (GL-28 ~ -37m) の沈下量に対応する。地表面 (GL0m) の沈下量の計算値は、未改良断面 ($x=-56m$) が最も大きく36cmで、アレー断面はそれより20%程度小さい28cmである。アレー断面は、GL-16m以浅のB-u層のせん断ひずみが抑制されているため、未改良断面よりも沈下が小さく評価されている。一方、改良断面の地表面沈下量は18cmで未改良断面の50%程度になっている。このように、二次元モデルの解析結果を用いた沈下量の計算値は、断面位置により異なった二次元的な分布を示し、同じ未改良域でも、改良層から十分離れた断面と改良層に近い断面では沈下量が異なる。成層状態を仮定した一次元モデルで

は、このような差異は算出できない。未改良断面については実測による未改良域の平均沈下量の下限付近であり、改良断面については実測値よりやや大きな値であるが、これらの計算値は近似的には妥当なものと考えられる。一方、アレー断面に対応する改良層直近の未改良層の実測値は不明であるが、計算結果は改良層直近の未改良層の沈下が、平均的な未改良層の沈下に比べ小さかった可能性を示すものと考えられる。

6. まとめ

兵庫県南部地震時に神戸市ポートアイランドで得られたアレー観測記録のシミュレーションを有効応力解析により実施した。未改良埋立地盤と改良埋立地盤の一次元モデルの解析と、未改良域と改良域を含んだ二次元モデルの解析を実施し、改良地盤の地震時挙動の検討と、近傍の改良地盤がアレー観測記録へ及ぼす影響を検討した。さらに、二次元モデルの解析結果を用いて、各断面の沈下量を算定した。以下に本研究で得られた結果を示す。

- (1) 未改良域と改良域の地中と地表の地震応答は異なる。未改良の埋土層は液状化するが、改良した埋土層は液状化しない。しかし、改良層直下の未改良層は大きなひずみが生じ液状化する。さらに、改良層の存在は深部の沖積砂礫層のひずみや過剰間隙水圧の値にも影響する。一次元モデルでは、未改良埋土層の液状化により表層の加速度の増幅が抑えられ、改良モデルより小さくなる。一方、速度は表層付近で増幅し、改良モデルよりむしろ大きくなる。
- (2) 二次元モデルの解析結果は、一次元モデルの結果と異なる。二次元モデルでは、未改良埋土層と改良埋土層の複雑な相互作用により生じた短周期成分と、改良層による近傍の未改良層の拘束効果により、表層の応答値に二次元的な分布が見られる。二次元モデルの解析結果は、一次元モデルの結果よりアレー観測記録との対応がよく、観測値には近傍の改良層の影響があったものと推測される。これらは、成層状態を仮定した一次元モデルでは、厳密な記録の再現はできないことを示している。
- (3) 二次元モデルの解析結果を用いて算定した鉛直断面の液状化後の地盤沈下量は、断面位置により異なる。改良断面の地表面沈下量は、未改良断面の50%程度となる。改良域に近い未改良域では、改良層による変形拘束効果を受けせん断ひずみが抑

制されるため、改良地盤から十分離れた未改良断面より地表面沈下量が20%程度小さい。未改良断面と改良断面の地表面沈下量は、概ね実測値と整合する。

- (4) 一次元モデルと二次元モデルを用いた解析の応答値の差異は、改良層と未改良層の境界部から十分離れた位置では比較的小さい。しかし、改良層と未改良層の境界部に近い位置での応答の差異はやや大きく、それを正確にシミュレーションするためには、近傍の改良層を考慮した多次元解析が必要であると考えられる。少なくとも、解析の応答の最大値に着目する場合や、それを利用して他の応答量を算出するような場合には、その値に大きな差異が含まれる可能性がある。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、地盤物性の設定等について議論していただいた中部電力(株)上田稔氏と熊崎幾太郎氏、及び要素実験データの試験条件に関して助言を頂きました基礎地盤コンサルタンツ(株)後藤政昭氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 関西地震観測研究協議会資料, 1995.
- 2) 川瀬博, 佐藤智美, 福武毅芳, 入倉孝次郎: 兵庫県南部地震によるポートアイランドでのポアホール観測記録とそのシミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 第475号, pp.83-92, 1995.
- 3) Yamazaki, F., Ansary, M.A. and Towhata, I.: Application of a dynamic effective stress model at a reclaimed site during the Great Hanshin earthquake, 1995, *Earthquake Geotechnical Engineering*, IS TOKYO'95, pp.591-597, 1995.
- 4) 福武毅芳: ポートアイランドにおける地盤の液状化と基礎の挙動解析, 日本建築学会関東支部構造部会シンポジウム「兵庫県南部地震における地震動と建築物の応答」, pp.9-16, 1995.
- 5) 岡二三生, 八嶋厚, 田口洋輔, 立石章, 古川浩司, 福嶋研一: 鉛直アレー観測記録を用いたポートアイランドの連成3次元液状化解析, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.137-144, 1996.
- 6) Cubrinovski, M. and Ishihara, K.: Assessment of the Kobe port island liquefaction through analytical simulation of the vertical array records, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.157-164, 1996.
- 7) 鄭京哲, 大保直人: 兵庫県南部地震におけるポートアイランド地盤応答の有効応力解析, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.169-174, 1996.
- 8) 塩見忠彦, 畑中宗憲, 内田明彦, 吉沢睦博: 兵庫県南部地震で液状化したポートアイランドの地震応答解析, 建築学会大会学術講演梗概集, pp.815-816, 1996.
- 9) 吉田望: 1995年兵庫県南部地震におけるポートアイランドの地震応答解析, 土と基礎, Vol.43, No.10, pp.49-54, 1995.
- 10) 伊藤浩二, 後藤洋三: 改良された埋立マサ土地盤の液状化特性と有効応力解析, 第10回日本地震工学研究発表会, pp.1371-1376, 1998.
- 11) 沼田淳紀, 森伸一郎, 関宝其: 神戸ポートアイランドにおける地震応答解析と簡易液状化判定, 第10回日本地震工学研究発表会, pp.1481-1486, 1998.
- 12) 上田稔, 熊崎幾太郎, 鈴木隆: 兵庫県南部地震のポートアイランドにおける地盤地震応答の全応力非線形解析によるシミュレーション, 電力土木, No.282, pp.62-66, 1999.
- 13) 善功企, 山崎浩之: 埋立地に用いたまさ土の液状化特性, 土と基礎, Vol.44, No.2, pp.60-63, 1996.
- 14) 内田明彦, 畑中宗憲, 鈴木善雄: 神戸ポートアイランドの埋立マサ土地盤の静的及び動的強度特性, 第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.135-142, 1997.
- 15) 阪神淡路大震災・地盤調査研究会: 平成9年度報告書, 1998.
- 16) 藤川智, 福武毅芳, 上田稔, 熊崎幾太郎: 神戸ポートアイランド鉛直アレー記録の二次元シミュレーション解析, 第25回地震工学研究発表会, pp.321-324, 1999.
- 17) Yoshida, N.: Liquefaction of improved ground in Port Island and its effect on vertical array record, *Proc. of 12th WCEE*, No.1509, 2000.
- 18) Yashima, A., Oka, F. and Kanami, H.: 3-D analysis to evaluate the effect of soil improvement on liquefaction of man-made island, *Proc. of 12th WCEE*, No.2116, 2000.
- 19) 神戸市開発局: 兵庫県南部地震による埋立地地盤変状調査(ポートアイランド, 六甲アイランド)報告書, 1995.
- 20) 永瀬英生, 辻野修一, 宍道玲, 吉田望, 安田進: 平成7年兵庫県南部地震におけるポートアイランドでの液状化層推定に関する研究, 第50回土木学会年次学術講演会概要集, 1995.
- 21) 川瀬博: 7.3章地盤の非線形応答, 阪神・淡路大震災調査報告共通編-2, 1編地震・地震動, 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会, pp.291-301, 1998.
- 22) 福武毅芳, 大槻明, 藤川智: 三次元液状化解析による実測記録のシミュレーション, 第27回土質工学研究発表会, pp.1103-1106, 1992.
- 23) 大槻明, 渡辺浩平, 竹脇尚信: 不整形地盤における二次元建屋地盤系液状化解析, 土木学会論文集, 第368号/1-5, pp.363-372, 1986.
- 24) Fukutake, K., Ohtsuki, A., Sato, M. and Shamoto, Y.: Analysis of saturated dense sand-structure system and comparison with results from shaking table test, *Earthquake eng. struct. dyn.* 19, pp.977-992, 1990.
- 25) Yasuda, S., Ishihara, K., Harada, K. and Shinkawa, N.: Effect of soil improvement on ground subsidence due to liquefaction, *Special Issue of Soils and Foundations*, pp.99-107, 1996.

- 26) Ishihara, K., Yasuda, S. and Nagase, H. : Soil characteristic and ground damage, *Special Issue of Soils and Foundations*, pp.109-118, 1996.
- 27) Shamoto, Y. and Zhang, J.-M. : Evaluation of seismic settlement potential of saturated sandy ground based on concept of relative compression, *Special Issue of Soils and Foundations*, pp.57-68, 1998.
- 28) 平間邦興 : 相対密度の適応に関する2,3の私見, 砂の相対密度と工学的性質に関するシンポジウム論文集, 1981.
- 29) Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y. : Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT *N*-value and fines content, *Soils and Foundations*, Vol.23, No.4, pp.56-74, 1983.

(2000. 9.18 受付)

SIMULATION OF THE VERTICAL SEISMIC ARRAY RECORDS AT THE KOBE PORT ISLAND CONSIDERING THE EFFECT OF THE IMPROVED GROUND ADJACENT TO THE ARRAY SITE

Satoshi FUJIKAWA and Kiyoshi FUKUTAKE

The vertical seismic array records at the Kobe Port Island during the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake are simulated. One-dimensional ground models and a two-dimensional ground model are numerically analyzed by effective stress method. The 2-D model consists of the unimproved area including seismic array site and adjacent improved area by compaction method. The 1-D models represent those two areas respectively. Compared the 2-D model with the 1-D models, the improved ground affects the earthquake responses of the seismic array point. Moreover, the vertical settlement of the ground surface using the results of the 2-D analysis corresponds to the observational settlement.