

# 上下動が液状化地盤の応答に与える影響

森 勇人1・澤田 純男2・吉田 望3

1中部電力 (〒461-8680 名古屋市東区東新町1)

E-mail: Mori.Hayato@chuden.co.jp

2京都大学教授 京都大学防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

E-mail: sawada@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

3東北学院大学教授 工学部環境建設工学科 (〒985-8537 宮城県多賀城市中央1-13-1)

E-mail: yoshidan@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

強震時における水平動と上下動の相互作用の影響を調べるため、飽和・不飽和地盤モデルについて3次元有効応力応答解析を行った。その結果、相互作用の影響は均質地盤モデルではほとんど現れていなかった。しかし、不飽和地盤モデルでは、上下動の影響により有効平均主応力が変化し、上下動成分がダイレタンシーの効果を介して水平動成分に現れていることが分かった。また、兵庫県南部地震時のポートアイランド鉛直アレイ記録を用いて動的シミュレーションを行った結果、この相互作用の影響が観測記録に現れていることが確認された。

Key Words: Coupling effect, vertical motion, liquefaction, ground response, FEM

#### 1. はじめに

力学的には、線形領域では水平動と上下動は独立だが、 構成則が非線形の場合には、相互に作用し合う可能性が ある. 従って強震時にはこの影響が地盤応答に現れてい ることが考えられる. この問題について, 石原<sup>1)</sup>は連続 体理論に基づき上下動が飽和砂液状化に及ぼす影響を論 じ、上下動から水平動への影響がほとんどないことを指 摘した. 上下動の伝播時には、水平面の垂直応力と同時 に、鉛直面の垂直応力も誘起される。飽和土のポワソン 比はほぼ0.5であるので、上下動に伴って生じる応力は ほぼ純粋に圧縮応力となる. 圧縮応力は間隙水と土粒子 骨格の両方で力を受け止めることになるが、飽和土では 間隙水がほとんどの力を伝えることになる. 従って上下 動伝播中の有効応力の変化はほとんどなく、つまり上下 動が水平動に及ぼす影響もない、というものである. こ の論理によると水平動から上下動に及ぼす影響もほとん どないことになる.

しかし、これはいくつかの理想的な前提条件に基づいたものである。通常、表層地盤は不飽和で、土粒子骨格が担う力は完全飽和状態より大きい。またダイレタンシーにより水平動と上下動が作用しあうことも考えられる。水平動と上下動の相互作用の問題について翟ら<sup>2</sup>は飽和砂の振動実験を行い、上下動の入力によって水平動の

挙動に変化があったこと、より速く液状化したことを報告している。それに対して、森ら<sup>3</sup>はまさ土の振動台による液状化実験を通して、上下地震動が飽和砂地盤の液状化にほとんど影響しないという結果を得ている。ただし両実験による結果には再現性の問題があり、はっきりとした結論を得ていない。

不飽和地盤における液状化の様子については福島ら<sup>4</sup> や鎌田ら<sup>5</sup>が水平動入力により調べている。ただし不飽和地盤において上下動と水平動を加えて液状化実験を行った研究はまだ報告されていない。

相互作用の影響が実際の地盤応答にどうのように現れるのかを適切に評価することは、耐震設計技術の向上に寄与するものである。そこで本研究では、飽和均質地盤と不飽和均質地盤において動的解析を行い、上下動入力の有無・水平動入力の有無により地盤応答に現れる変化を評価することで、水平動と上下動の相互作用の影響を調べる。さらに兵庫県南部地震時のポートアイランド地盤の動的解析を行い観測記録と比較することで、得られた相互作用の効果が実現象を再現するものであるかを確認する。解析には構造及び地盤応答システム計算のための汎用プログラム群、OpenSees®を使用する。解析手法については水と土を連成させた3次元有効応力解析手法を用い、弾塑性理論に基づいた液状化を表現できる構成モデルを導入する。



図-1 FEMモデルの概要

表-1 地盤の材料定数

(単位系:ton,m,s)

地 盤	Н	ρ	$G_r$	$B_{sr}$	$B_f$	φ	$\phi_m$	с
I	10	2.1	8500	31200	2×10 <sup>6</sup>	38.2	28	0
II	10	2.1	8500	31200	3.5×10 <sup>5</sup>	38.2	28	0

 $[H(m): 層厚, \rho(t/m^3): 密度, G_r(kPa): 基準剛性,$ 

 $B_s(\mathbf{k}\mathbf{P}_a)$ : 士骨格の基準体積弾性率, $B_f(\mathbf{k}\mathbf{P}_a)$ : 水の体積弾性率, $\phi$ (度): 破壊角, $\phi_n$ (度): 変相角, $c(\mathbf{k}\mathbf{P}_a)$ : 粘性]

#### 2. 連成3次元液状化解析手法

まず本研究で用いる解析手法について述べる. 飽和地盤には, Biotの2層混合体理論に基づき固相の変位3次元と液相の間隙水圧の4つを未知数とする支配方程式を用いる. また非排水条件を仮定する. 釣り合い式と連続式はそれぞれ式(1), 式(2)のようになる.

$$\rho \ddot{u}_i = \sigma_{ii,i} + \rho b_i \tag{1}$$

$$\delta_{ij}\dot{\mathcal{E}}_{ij} = \frac{n}{B_s}\dot{p} \tag{2}$$

ここで $\rho$ は密度, $u_i$  は変位ベクトル, $\sigma_{ij}$  は応力テンソル, $b_i$  は物体力, $\delta_{ij}$  はクロネッカーのデルタ, $\varepsilon_{ij}$  はひずみテンソル,n は間隙率, $B_f$  は液層の体積弾性率,p は間隙水圧を表している.式(1),式(2)を FEM により空間的に,Newmark の $\beta$ 法により時間的に離散化したものを本研究の支配方程式として使用する.

不飽和地盤の場合には、地盤中に土・水・空気の3者が存在しており、そのままではBiotの2層混合体理論の適用範囲外である。しかし水の体積弾性率を水と空気の混合体のそれとみなすことにより、不飽和地盤も同様の支配方程式で表現可能である。そこで本研究では、水の体積弾性定数を飽和地盤の場合より小さくすることにより不飽和地盤を考慮する。

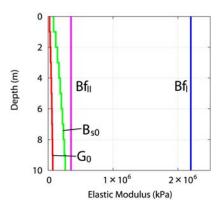


図-2 弾性定数の深度分布

土の構成則には、弾塑性理論に基づき拘束圧依存性を 考慮したDnucker-Parger型多重降伏曲面、偏差移動硬化則, 及び液状化の挙動をフェイズごとに再現する流れ則 (Elgamal et al. $^{n}$ ) を用いる.

## 3. 均質飽和地盤・均質不飽和地盤における 上下動と水平動の相互作用

#### (1) 解析モデル

ここでは層厚10mの均質地盤を考え、これを図-1に示すように1辺1mの立方体要素を使い柱状に離散化する. さらに側面では同じ深さの節点の変位を同じにすることで1次元にモデル化した.また、底面にはダッシュポットを配置し、入射波入力を可能にした.

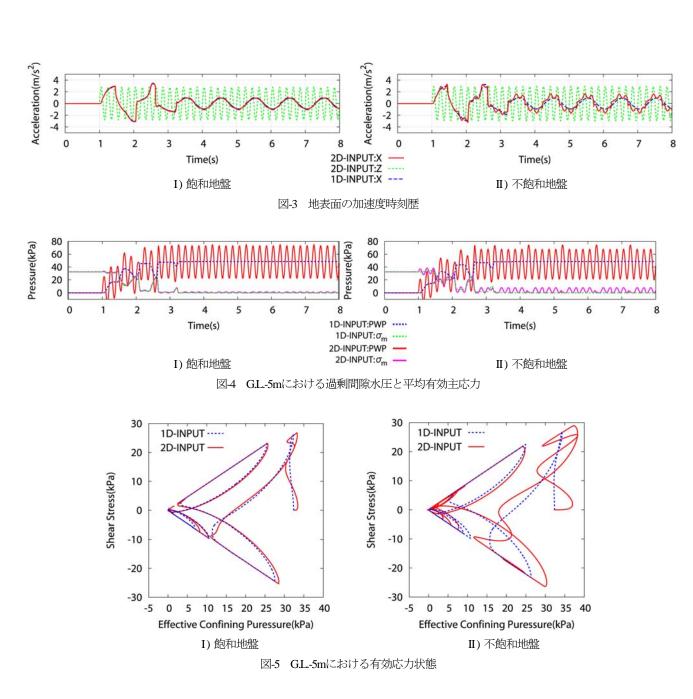
#### (2) 材料パラメータ

本章では飽和地盤,及び不飽和地盤の2つの地盤を考慮する.材料パラメータは表-1のように設定した.これらのパラメータはポートアイランド地盤の埋土層(まさ土)を文献®を参考に設定したものである.地盤Iは飽和状態を,地盤Iは不飽和状態をモデル化している.2つのモデルは水の体積弾性率 $B_f$ のみに違いがある.不飽和地盤の $B_f$ はポートアイランド第2層の計測値である飽和度69~88%程度に対応している.図-2に弾性定数の深度分布を示す.土骨格の弾性定数(剛性 $G_0$ と体積弾性率 $B_{00}$ )は

$$G_0 = G_r \times \sigma_m^{\prime 0.5} \tag{3}$$

$$B_{s0} = B_{sr} \times \sigma_m^{0.5} \tag{4}$$

により地盤の拘束圧依存性を考慮しているため、深さ方向に大きくなっている。ここで $\sigma'_m$ は平均有効主応力である。



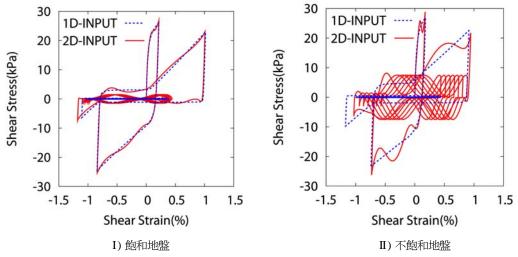


図-6 GL.-5mにおけるせん断応力-せん断ひずみ関係

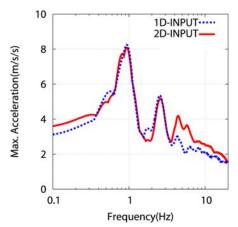


図-7 不飽和地盤地表面における水平加速度応答スペクトル

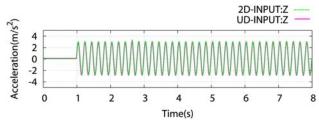


図-8 不飽和地盤地表面における上下加速度時刻歴

#### (3) 入力条件

入力波形として、水平方向入力では固有周波数 1Hzで加速度振幅3m/s²の正弦波、上下方向入力では固有周波数5Hzで同様の加速度振幅の正弦波を用いる。これをモデルの下端に入力する。すなわち、各成分とも振幅1.5m/s²の入射波を入力することになる。それぞれの成分の固有周波数は、1995年兵庫県南部地震時にポートアイランド地表面で観測された加速度応答スペクトルの卓越周波数を参考に設定している。本解析では入力条件として以下の3ケースを考える。

a) UD-INPUT:上下1方向入力(上下動5Hz)

b) 1D-INPUT: 水平1方向入力(水平動1Hz)

c) 2D-INPUT: 2方向入力(水平動1Hz+上下動5Hz)

各要素にはRayleigh減衰を導入する.減衰は質量比例項,剛性比例項それぞれに均等に受け持たせ,地盤の一次モードに対して3%とした.計算時間は10秒,数値積分の時間増分は0.001秒で解析を行った.

#### (4) 解析結果及び考察

まず,b)水平1方向入力時とc)2方向入力時の結果を比較して,上下動の有無が地盤応答に与える影響を考察する.

図-3に飽和地盤及び不飽和地盤地表面における,水平 1方向入力時と2方向入力時の加速度時刻歴の比較を示す. 水平加速度についてみると,飽和地盤では上下動の有無 による変化はほとんどない.それに比べて不飽和地盤で は、2方向入力時の水平動に加える形で上下動と同様の 周期を持った振動が現れている。不飽和地盤においては 液状化時に上下動が水平動に影響することが確認される。

この結果を図-4に示した過剰間隙水圧と平均有効主応力の時刻歴、図-5及び図-6に示した有効応力状態、せん断応力-せん断ひずみ関係から考察する。図-4から、過剰間隙水圧時刻歴は飽和地盤、不飽和地盤のどちらの場合にも上下動の入力により大きく振動していることが分かる。一方、平均有効主応力の時刻歴は飽和地盤と不飽和地盤で挙動が異なる。平均有効主応力の値は飽和地盤では水平1方向入力と2方向入力でほとんど違いがないが、不飽和地盤では2方向入力時に過剰間隙水圧と同様の周期の振動が確認できる。地盤中の上下動は、水の体積弾性率 $B_f$ と土骨格の体積弾性率 $B_s$ 。に力を担われて伝播している。両者の大きさの比は飽和地盤では約10倍であるが、不飽和地盤では1.5-2倍程度と小さくなっている。そのため不飽和地盤では上下動の伝播のために平均有効主応力が担う力が増えていると考えられる。

不飽和地盤ではこの平均有効主応力の振動が図5の有効応力状態,図-6のせん断応力-せん断ひずみ関係に影響を及ぼしている。その効果の特徴として、せん断応力の振動が見られる。さらに液状化後、水平1方向入力時には完全にせん断応力を失ったままであるのに対して、2方向入力時には上下動の震動によりせん断応力が回復しているのが分かる。せん断応力は水平動に直接影響するので、上下動の入力の有無によって水平動に変化が起ったと考えられる。

一方,飽和地盤では平均主応力の振動が小さいために、図-4の有効応力状態、図-5のせん断応力-せん断ひずみ関係がほとんど変化せず、その結果上下動から水平動への作用もほとんどなかったと考えられる.

図-7に不飽和地盤地表面における水平1方向入力と2方向入力時の水平加速度応答スペクトルの比較を示す. 10 秒間の計算時間中に定常状態を作りだすため減衰定数を15%に設定した. 1Hz付近にある卓越周波数とそのピーク値は上下動の有無によってほとんど変化していない. しかし, 2方向入力時の上下動周波数である5Hz付近では, 上下動の入力により2方向入力時の応答値は1方向入力時よりも1.5倍程度大きな応答値となっている.

次に、a)上下1方向入力時とc)2方向入力時の結果を比較する。図-8に不飽和地盤地表面における、上下1方向入力時と2方向入力時の上下加速度時刻歴の比較を示す。両者にはほとんど変化がみられない。この結果は飽和地盤における地表面の上下加速度時刻歴でも同様である。今回の解析条件では、飽和地盤・不飽和地盤、どちらの場合においても水平動から上下動への影響は非常に小さい。

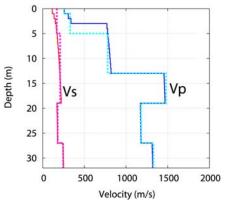


図-9 ポートアイランド地盤の速度構造 (実線:設定値、太線:観測値)

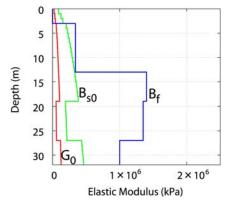
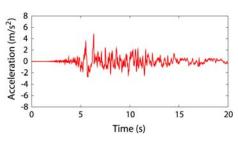
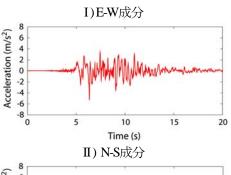


図-10 弾性定数の設定値記録と地盤モデル





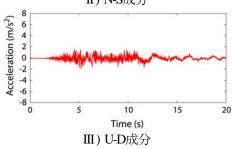


図-11 入力加速度波形

表-2 ポートアイランド地盤の材料定数

(単位系:ton, m, s)

No.	地質	Н	ρ	$G_r$	$B_{sr}$	$B_f$	$\phi$	$\phi_m$	с
1	土さま	4.5	1.8	7000	27500	0	38.2	28	0
2	土さま	7.5	2.1	8500	31200	35000	38.2	28	0
3	まさま	6.5	2.1	8500	31200	1×10 <sup>5</sup>	38.2	28	0
4	粘土	10	1.8	4200	15400	1×10 <sup>5</sup>	0	0	90
5	砂礫	4	2	8400	30800	1×10 <sup>5</sup>	45	28	0
			ρ	$V_s$	$V_{\rho}$				
基盤	砂礫		2	243	1341				

 $[H(m): 層厚, \rho(t/m^3): 密度, G_r(kPa): 基準剛性,$ 

 $B_s(\mathbf{kPa})$ : 土骨格の基準体積弾性率, $B_r(\mathbf{kPa})$ : 水の体積弾性率, $\phi$ (度): 破壊角, $\phi_n$ (度): 変相角, $c(\mathbf{kPa})$ : 粘性,

 $V_s(m/s): S$ 波速度, $V_a(m/s): P$ 波速度 ]

#### 4. ポートアイランド記録のシミュレーション

#### (1) 目的

不飽和地盤における上下動から水平動への作用が実現象を表すものであることを確認するために、実際の観測を用いて動的解析を行い観測結果との比較を行う. 対象は1995年兵庫県南部地震時のポートアイランドの鉛直アレー記録である. この観測点は3成分加速度地震計アレイが設置されており、本震時には液状化が観測されている. また安田<sup>9</sup>が本震後に行った調査によると観測点地表付近の飽和度は69-88%であった. これらのことからポートアイランドでは本震時に上下動から水平動への作用が現れている可能性がある.

#### (2) 解析モデル

本研究では、地表からGL-32mまでの地盤をモデル化する. 一辺0.5mの立方体要素を使い前章と同様、柱状に離散化し、同じ深さの節点を等変位とすることで1次元にモデル化した. 底面には弾性境界を適用する. 表-2に設定したパラメータの一覧を示す. パラメータの設定には文献<sup>8)</sup>を参考にした. PS検層結果から全5層の地盤とし、地下水位をGL-3mとした.

各層の土粒子骨格の初期剛性  $G_0$  、初期体積弾性率  $B_{s0}$  、及び水・空気混合体の体積弾性率  $B_f$  は地震前に行われたPS検層(図-9)から図-10のように設定した。土粒子骨格の弾性定数には拘束圧依存性があるものとし、地盤の静止土圧係数  $K_0$  は0.5を使用した。ただし不飽和地盤では  $B_{s0}$  と  $B_f$  はトレードオフの関係にありP波速度だけから決定はできない。そこでまず、地下水位より上の地盤を乾燥地盤とみなして、その層の  $B_{s0}$  をPS検層によるP波速度と一致するように設定する。次に、土粒子

骨格のポアソン比ルを弾性論に基づき以下の式により算出する.

$$v = \frac{3B_{s0} - 3G_0}{3(G_0 + 3B_{s0})} \tag{5}$$

さらに、このiが地下水位以深の各深度でも保持されるとして、各層の $B_{s0}$ を求めた、そしてiPS検層によるiP波速度結果と一致するようにiByを各層で設定した、ポートアイランド地盤におけるi375となった、常温での水の体積弾性率はi2.2×i10 $^{6}$  (i18i19i20) 程度であるが、設定されたi10i19i19i109 となっている、地震前後で飽和度が変化している可能性があるが、今回設定した第i2i16i10i2000 和度に対応している。

#### (3) 入力地震動

入力地震動にはGL-32mにある地震計の観測波形<sup>8</sup>を 用いる.入力条件としては以下の2ケースを考える.

a) 1D-INPUT: 上下1方向入力b) 2D-INPUT: 水平2方向入力

c) 3D-INPUT: 3方向入力

入力地震動の各成分を図-11に示す.解析はP波到達から20秒間を時間ステップ0.001秒で行う.また前と同様,1次モードに対して3%のRayleigh減衰を考慮する.

#### (4) 解析結果及び考察

まず,b)水平2方向入力時とc)3方向入力時の結果を比較することにより,上下動の有無が地盤応答に与える影響を考察する.

図-12 I)及びII)に水平2方向入力, 3方向入力, 及び観測 記録の地表面水平加速度時刻歴を示す. 水平2方向入力 時と3方向入力時の地表面加速度を比較すると、3方向入 力の場合に主要動以降で高周波数の振動が現れているこ とが確認できる. これは前章の不飽和均質地盤での結果 と同様の傾向であり、上下動からせん断応力を介した水 平動への作用の影響であると考えられる. さらに3方向 入力時の加速度時刻歴を観測波形と比較すると、この高 周波数成分の振動は観測波形と良く一致していることが 分かる. また図-12 Ⅲ)の地表面加速度U-D成分をみると, 観測波形は3方向入力により良く再現されている. これ らのことにより本解析の信頼性が確保されるとともに、 上下動から水平動への作用が実際の地盤内で起こってい ること、それが水平動の高周波数成分として現れている ことが確認される. ただし, 実記録における水平動の主 な高周波成分が、地震計の設置環境や表層の地盤特性、 3次元効果などにより現れている可能性も否定できない

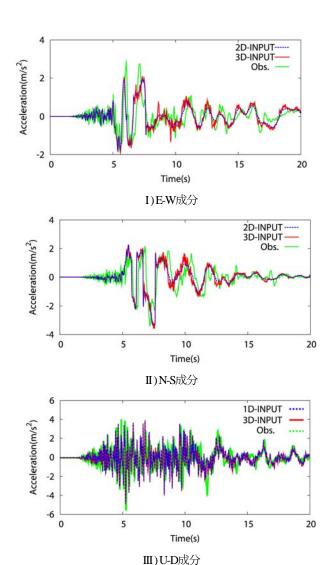


図-12 ポートアイランド地表面の加速度時刻歴

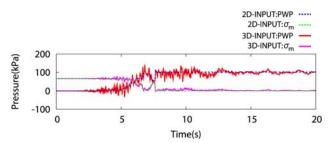


図-13 G.L.-8mにおける過剰間隙水圧と平均有効主応力

ため、実験により不飽和地盤での地盤の挙動を確認する 必要がある.

図-13に水平2方向入力時及び3方向入力時のGL-8mでの過剰間隙水圧と平均有効主応力の時刻歴を,図-13に同じくGL-8mでのせん断応力-せん断ひずみ関係を示す.前章の不飽和均質地盤での結果と同様に,上下動入力により,平均有効主応力の振動が起こっていること,せん断応力の振動や剛性が復活していることが確認できる.

次に、a)上下1方向入力時とc)3方向入力時の結果を比

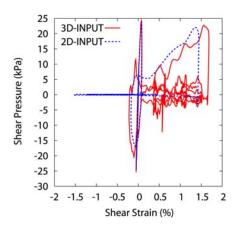


図-14 G.L.-8mでのせん断応力 $\sigma_{v}$ -せん断ひずみ $\gamma_{v}$ 関係

較する.図-12 III)に不飽和地盤における、上下1方向入力時と3方向入力時及び観測記録の地表面上下加速度時刻歴を示す.前章と同様、水平動の有無による上下動の応答にはほとんど違いがみられない.つまり水平動から上下動への作用は非常に小さい.

#### 5. まとめ

線形時には独立な上下動と水平動も、非線形挙動時には両者の相互作用が生じる可能性がある。特に水の影響が小さい不飽和土において、液状化のような強い非線型挙動が起こっている地盤の場合、この影響が現れやすいと考えられる。そこで本研究では連成3次元有効応力解析を行い、上下動入力の有無・水平動入力の有無による地盤応答の変化から相互作用の影響を評価した結果、以下の知見を得た。

- (1) 均質飽和地盤に正弦波を入力し動的地盤応答解析を 行った. その結果, 上下動の伝播の大部分が間隙水に担 われており, 土粒子骨格に上下動が与える影響は小さか った. 従って上下動が水平動の応答や, 液状化に与える 影響はほとんどなく, 連続体理論から液状化への上下動 の影響を論じた石原の理論の正当性を確認した.
- (2) 同様の解析を不飽和地盤について行った. その結果, 上下動の震動がせん断応力を介して水平動に影響を及ぼ していることが確認された. さらに, 液状化により失わ れた剛性が上下の震動によって回復する現象が見られた. (3) この効果を実現象から確かめるために, 兵庫県南部 地震において得られたポートアイランドの鉛直アレイ記 録を用いて動的解析を行い, 液状化時の地盤応答の再現

を試みた. その結果, 地表面の水平加速度に上下動のものであると考えられる高周波数成分が現れ, これが観測記録と合致することが確認された. このことにより上下動から水平動への影響が実際の観測記録水平動に現れている可能性を指摘した.

(4) 今回の解析では水平動から上下動への作用は、飽和 地盤・不飽和地盤、どちらの場合においても非常に小さ いものであった.

謝辞:本研究の実施に当たり、神戸市開発局提供の地震 記録を使用しました.記して感謝致します.

#### 参考文献

- 1) 石原研而: 土質動力学の基礎, 鹿島出版社, 1978.
- 2) 翟恩地, 宮島昌克, 北浦勝, 金本昌也: 飽和砂の間隙水圧 発生に及ぼす上下地震動の影響, 阪神・淡路大震災に関す る学術講演論文集, pp. 145-150, 1996.
- 3) 森伸一郎, 三輪滋, 沼田淳紀, 関宝琪:神戸人工島で噴出 したまさ土の振動台実験による液状化実験, 土木学会論文 集, Vol. I-37, pp. 231-248.
- 4) 福島康弘,安田進,西川修,岡崎修,平井哲:飽和 および不飽和における締固めたまさ土の液状化強度, 土木学会年次学術講演会講演概要集3A, Vol. 52, pp. 170-171, 1997.
- 5) 鎌田邦夫,大山敦郎,石原研而,塚本良道,黄永男:P波速度を用いる不飽和砂の液状化抵抗の評価,土木学会年次学術講演会講演概要集3A, Vol. 55, pp. 180-181, 2000.
- 6) OpenSees: <a href="http://opensees.berkeley.edu/">http://opensees.berkeley.edu/</a>
- Elgamal, A., Yang, Z. and Parra, E.: Modeling of cyclic mobility in saturated cohesionless soils, International Journal of Plasticity, Vol. 19, pp. 883-905, 2003.
- 8) 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.
- 9) 安田進, 小林利雄, 福島康弘: まさ土の液状化特性に与える飽和度と粒度の影響, 第10回日本地震工学シンポジウム 論文集, Vol. 10-2, pp. 1343-1348, 1998.

(2007.04.06 受付)

# EFFECTS OF VERTICAL INCIDENT WAVE ON LIQUEFIABLE GROUND RESPONSE

### Hayato MORI, Sumio SAWADA, Nozomu YOSHIDA

Coupling effect between horizontal and vertical behavior is investigated through the three-dimensional effective stress earthquake response analysis. The interactive effect is hardly observed in the saturated homogeneous model ground under the sinusoidal input motion in both horizontal and vertical directions. The coupling effect appears, however, in the unsaturated ground; effective confining stress changes under vertical motion, and vertical motion appears under the horizontal vibration because of dulatancy effect. Finally, the Port Island vertical array record obtained during the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake is simulated, and the behavior observed in the preceding analysis is confirmed to occur.