

鉛直アレー観測加速度波形を用いた地中構造物の応答に及ぼす 鉛直地震動の影響

Effect of Vertical Seismic Motions on the Response of Underground Structure Using Vertical Array Acceleration Records

伊東 守*、大塚 久哲**、豊永 臣悟***

Mamoru Itoh, Hisanori Otsuka, and Shingo Toyonaga

*佐藤工業(株) 中央技術研究所 土木研究部門 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町4-12-20)

＜九州大学大学院工学研究科建設システム工学専攻 博士課程(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)＞

**フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究科建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

***九州大学大学院工学研究科建設システム工学専攻 修士課程 (同上)

Generally, underground structure is designed considering only horizontal seismic motions. However, at 1995 Hyogoken Nanbu Earthquake, many underground structures were damaged by vertical seismic motions. Given this situation, this paper discusses seismic response of ground containing underground structure due to vertical seismic motions. To clarify the characteristic of vertical seismic waves, we use vertical observation records at Japan Atomic Energy Research Institute (Oharai Lab.), and compare with horizontal seismic waves. The analysis method is basically comparison 1-D and 2-D soil response analysis (FEM model), liner and non liner analysis using some parameters (maximum acceleration, displacement, axial force).

Key Words : vertical seismic motions, soil-structure interaction, vertical array records,
underground structure

1. はじめに

原子力分野や建築分野での重要構造物の耐震設計には上下動が既に取り入れられている¹⁾が、地中構造物ではまだ一般的なものとはなっていない。また、1995年の兵庫県南部地震に代表される内陸活断層による都市直下地震では、水平方向に加え鉛直方向にも大きな地震動が観測された。このような現状を踏まえ、鉛直地震動の増幅特性に関する研究²⁾や地中構造物の被害の原因究明に関する研究が行われている。

本研究では、鉛直方向に関する地震動の増幅特性やその性質の解明、および上下動が地中構造物や周辺地盤に与える影響の検討を行うために、日本原子力研究所大洗研究所(茨城県大洗町)において観測された鉛直アレー観測記録波形³⁾および兵庫県南部地震における神戸大学波形を用いて、地中構造物を有する地盤に鉛直地震動あるいは水平地震動を入力した場合の応答解析結果について検討した。

2. 入力地震動および対象構造物

2. 1 入力地震動

大洗において観測された加速度波形を用いて重複反射理論により算出した入力地震動(2E)を用いた。図1に入力地震動の時刻歴加速度波形およびフーリエスペクトルを示す。時刻歴波形の詳細な算出手順は以下の通りである。すなわち大洗研究所において観測された地震波形(1991年6月25日)の中から、深さ173.6mの位置で観測された最大32.9galの水平動を、構造物や地盤の非線形性を考慮できる程度の大きさとして、最大加速度を300galにスケーリングした。上下動については水平動と同じ倍率でスケーリングした。この水平動と上下動を用いて、1次元地盤応答解析をそれぞれ行い、図5に示す深さ26.5mのFEMモデル下端での入射波(E)を得た。

また、兵庫県南部地震(神戸大学)において観測された地震波も入力地震動として用いた。図2にそれらの時刻歴加速度波形(2E)とフーリエスペクトルを示す。大洗波は、神戸大学波に比し10Hz以上の周波数成

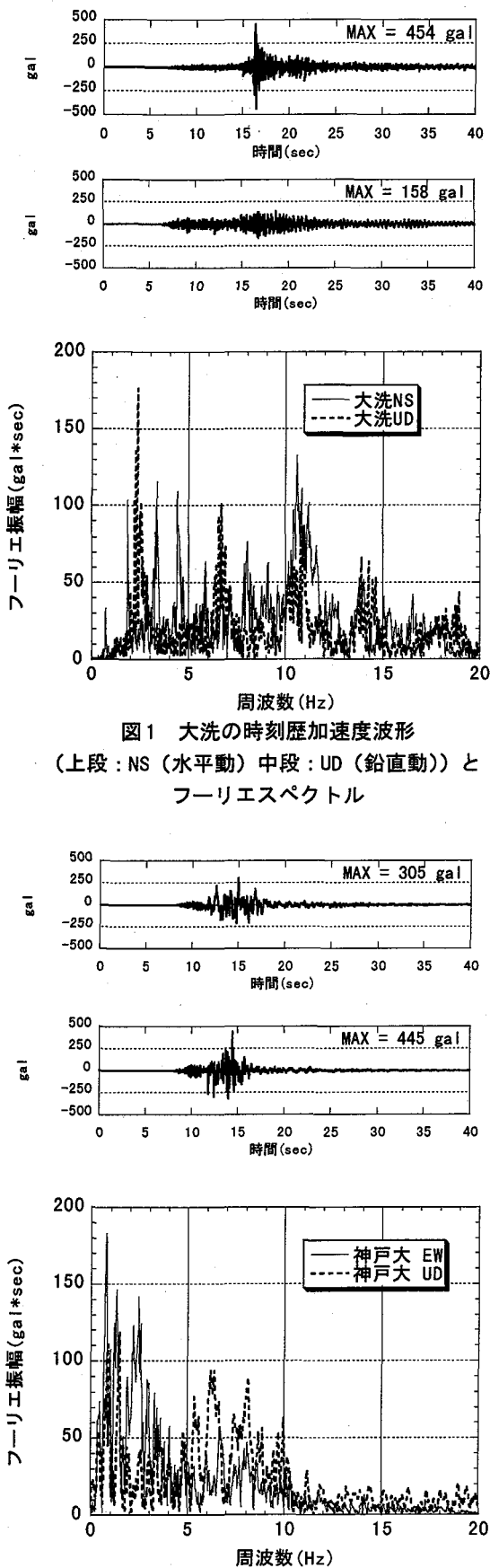


図1 大洗の時刻歴加速度波形
(上段: NS (水平動) 中段: UD (鉛直動)) と
フーリエスペクトル

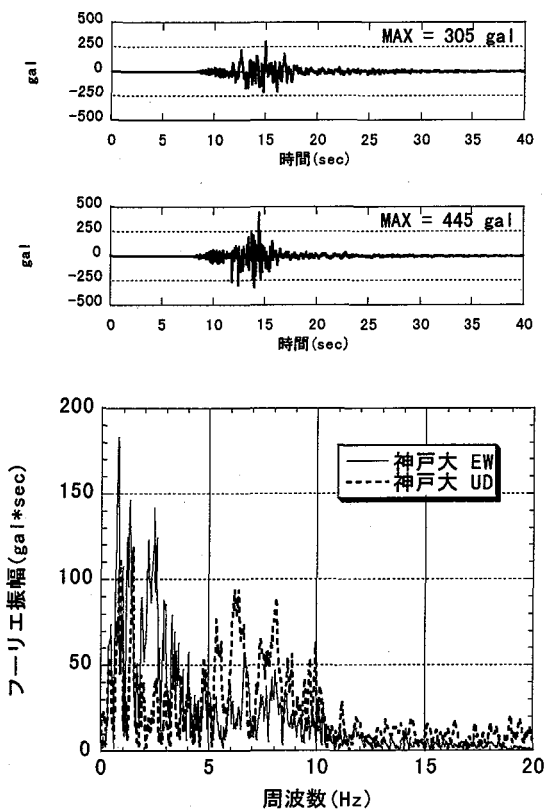


図2 神戸大学の時刻歴加速度波形
(上段: EW (水平動) 中段: UD (鉛直動)) と
フーリエスペクトル

分が水平動・上下動ともに多いが、本研究ではこのまま用いることにした。

2.2 対象地盤

解析対象地盤は、日本原子力研究所大洗研究所において鉛直アレー観測が行われている地盤とした。大洗の地層構成は地表より、ローム層、S波速度が約300～500m/sの見和層および石崎層、S波速度が約480～600m/sの鮮新統およびS波速度が1000m/s以上の中新統となっている。表1に地盤物性値を、図3に大洗の地盤のせん断波速度分布を示す。

表1 大洗の地盤物性値

TP(m)	地層	地盤計 設置位置	土層厚 H(m)	単位体積重量 γ (t/m ³)	せん断波速度 V_s (m/s)	せん断弾性係数 G (t/m ²)	ポアソン比 ν
+36.5	ローム層	No.4 -○-	3.5	1.33	230	7200	0.46
+33.0		(GL-1.2m)	4.5	1.93	350	24100	0.43
+28.5			1.5	1.78	300	16300	0.45
+27.0	見和層		11.0	1.82	440	36000	0.41
+16.0			6.0	2.05	650	88400	0.33
+10.0		No.3 -○-	12.0	1.93	430	36400	0.46
-2.0		(GL-32.1m)	1.5	1.89	380	27800	0.47
-3.5			24.5	1.85	370	25800	0.47
-28.0	石崎層		15.0	1.87	390	29000	0.45
-43.0		No.2 -○-	11.0	2.02	490	49500	0.45
-54.0		(GL-95.2m)	44.0	1.79	480	42100	0.45
-98.0	鮮新統		25.0	1.82	540	54200	0.44
-123.0		No.1 -○-	15.5	1.86	590	66100	0.43
-138.5	中新統	(GL-173.6m)	-	1.99	1020	211300	0.36

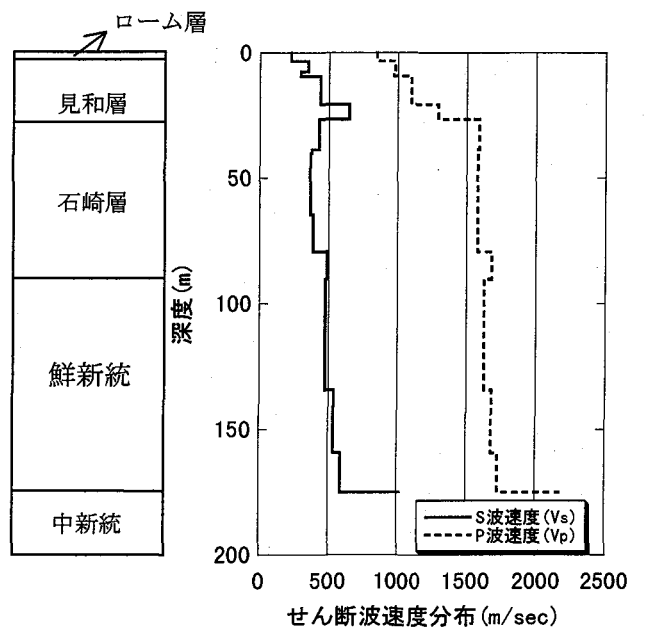


図3 大洗の地盤のせん断波速度分布

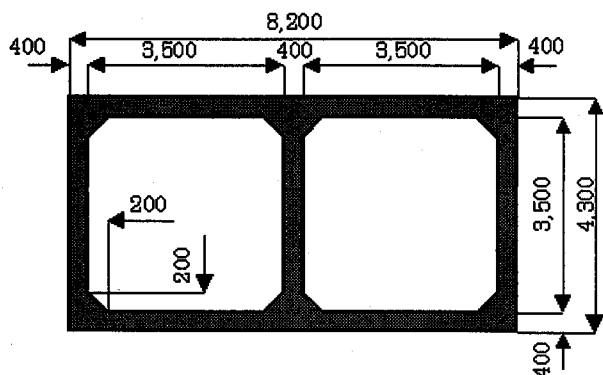


図4 地下構造物の形状寸法(単位: mm)

表2 対象構造物の緒元

密度	2.45 (tf/m ³)
ポアソン比	0.167
弾性係数	1.25×10 ⁶ (tf/m ²)
減衰定数	5%

2. 3 対象構造物

地中構造物は参考文献⁴⁾の例示設計編で用いられている鉄筋コンクリート製ボックスカルバートを用い、土被りは3.5 mとした。図4に対象構造物の形状寸法を、表2に対象構造物の諸元を示す。

3. 解析条件

本解析におけるFEMモデルを図5に示す。FEMモデルの地中構造物は、はり要素で線形、地盤は平面ひずみ要素で等価線形にモデル化した。解析領域は深さ26.5 m、幅57.4 mである。地盤は深さ3.5 mまではローム層、3.5 m以下は見和層とした。図6にローム層と見和層の $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 曲線を示す。これは大洗地盤における動的ねじりせん断試験と大型振動三軸試験のデータを曲線回帰(R-0モデルを修正)したものである。なお、2次元FEMモデルの解析には(株)CRC総合研究所のDINASを用いた。

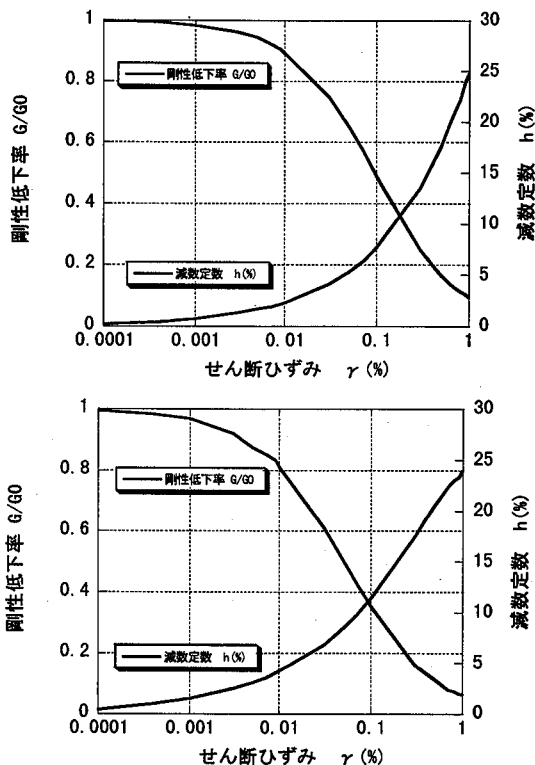


図6 $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 曲線
(上段: ローム層、下段: 見和層)

4. 固有値解析

先ず基本的な動的挙動を知るために、図5に示すFEMモデルを用いて固有値解析を行った。物性値は表1のローム層・見和層の値を、境界条件については、底面は2方向固定、側方は上下動を考慮するため自由とした。また、地中構造物の存在による固有周期への影響を評価するため、以下に示す3ケースの解析モデルについて解析した。

- (1) 地中構造物を含むモデル (図5)
- (2) 地中構造物のはり要素を取り除き、この部分を空洞としたモデル
- (3) 地中構造物が無く、地盤のみからなるモデル

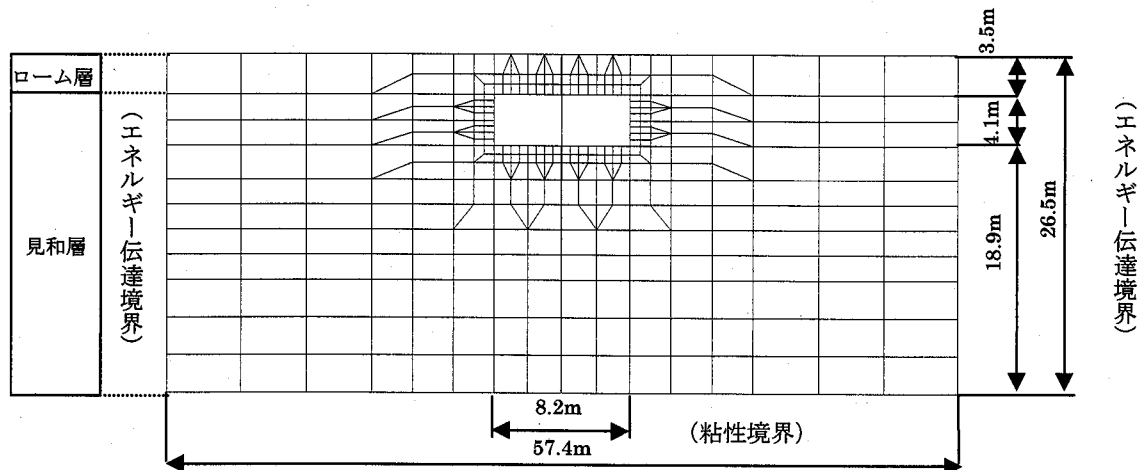


図5 FEMモデル図

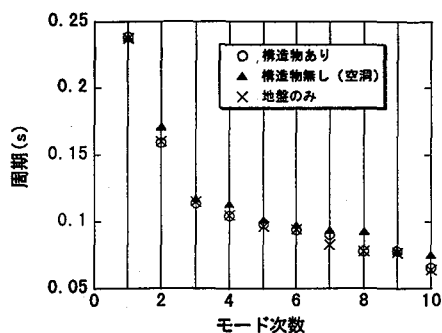


図7 モード別固有周期分布

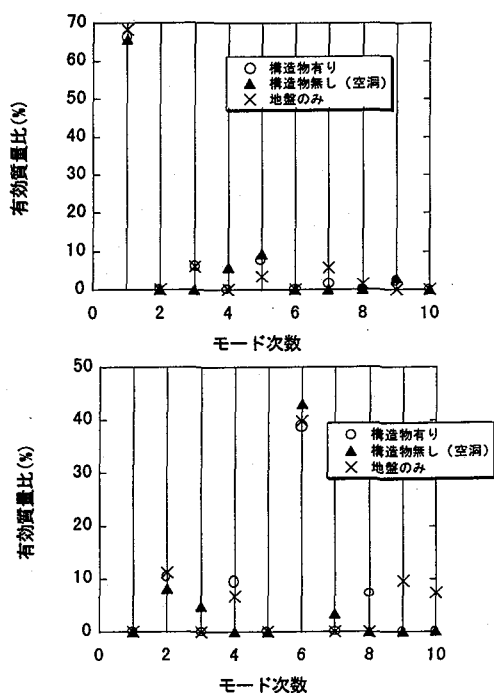


図8 振動方向別有効質量比
(上段：水平方向、下段：鉛直方向)

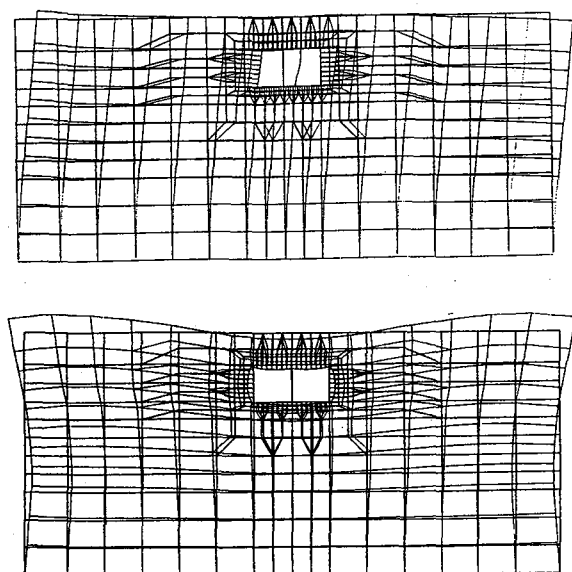


図9 構造物モデルのモード
(上段：1次モード、下段：6次モード)

図7に3ケースについてのモード別固有周期の分布図を示す。1次から3次の低次モードでは構造物の存在による固有周期への影響は殆ど見られないが、4次モード以上で3ケースに若干の差異が生じている。空洞があるケースが最も周期が長い。地盤要素のみのケースと構造物があるケースは7次モードを除いてほぼ同じである。

次に各ケースの振動方向別の卓越モードを把握するため、水平方向と鉛直方向の有効質量比の分布を図8に示す。

水平方向ではどのケースにおいても1次モードの有効質量比が70%に近く、1次モードが卓越していることが分かる。一方、鉛直方向では6次モードが卓越しており、有効質量比が40%程度となる。図9に構造物を有するモデルの1次と6次のモードを示す。

5. 複素応答解析

次に、地中構造物を有するFEMモデルを用いた複素応答解析について述べる。

境界条件は底面粘性境界、側方は水平・鉛直両方向ともにエネルギー伝達境界とした。また、水平方向と上下方向の地震動入力进行を考慮するため、水平方向の解析は複素応答法による等価線形解析、上下方向は縦方向のせん断ひずみの発生が小さいと思われるため、水平動の等価線形解析の収束物性値を用いた複素応答法による線形解析とした。ともに構造物は弾性体とした。初期物性値は水平動入力の場合、等価線形解析を行うため表1のローム層と見和層の物性値を用い、上下動入力の場合は1次元地盤応答解析の結果(収束せん断

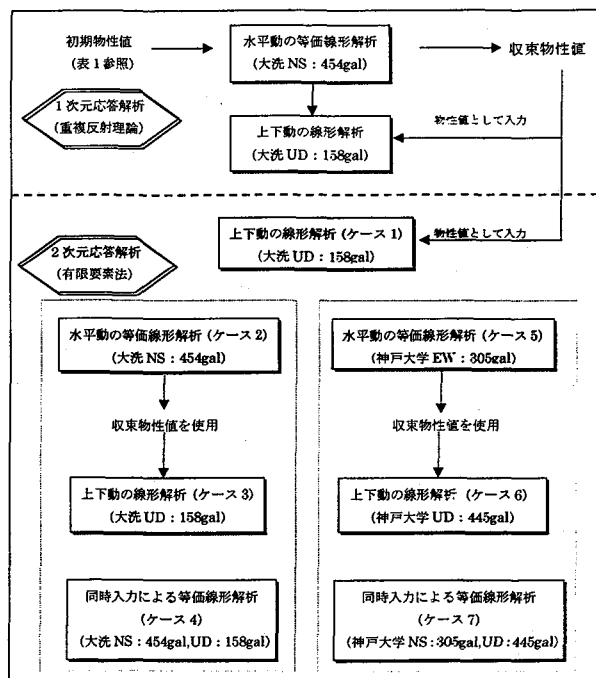


図10 解析フロー図

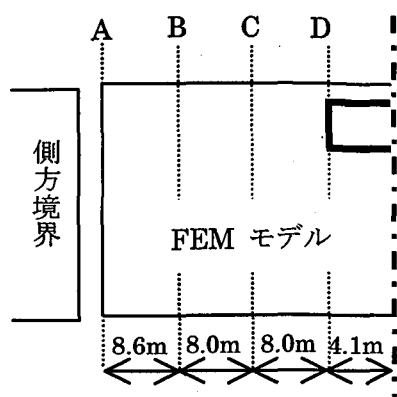


図11 FEMモデル検討測線

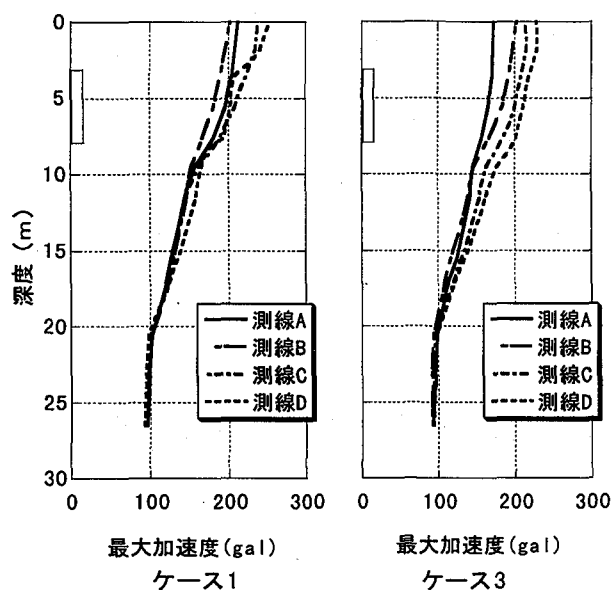


図12 最大鉛直加速度比較

(グラフ中の口は地中構造物の設置深さを示す。
以下のグラフについても同様である。)

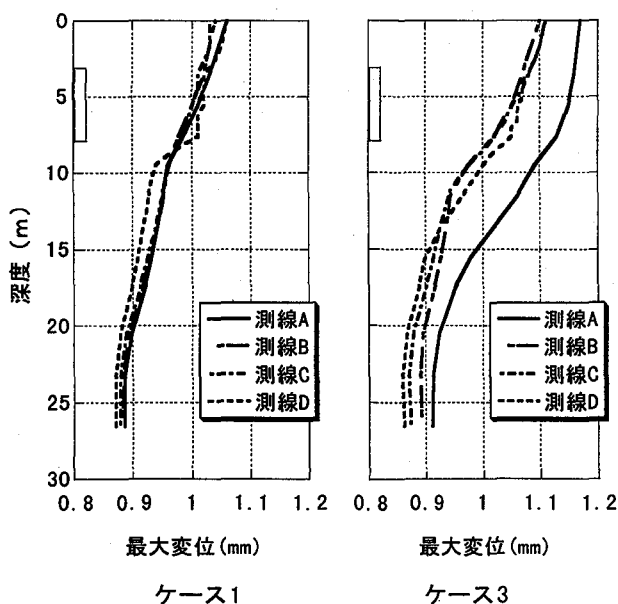


図13 最大鉛直変位比較

弾性係数、収束減衰定数)を用いた。更に水平方向と上下方向の地震動を同時に入力して等価線形解析を行った。解析を行った手順を図10に示す。大きな解析の流れとしては、先ず1次元応答解析を行い、次に2次元複素応答解析7ケースを行った。FEMによる解析において、地中構造物による周辺地盤への影響を考慮するため、図11に示すように側方境界から0m、8.6m、16.6m、24.6mの測線A～D上の節点について検討を行った。

5. 1 入力物性値の違いによる比較

上下動入力の場合の物性値に1次元の地盤応答解析による収束結果を用いた解析(ケース1)と上下動の入力の前にFEMモデルによる水平動の等価線形解析(ケース2)を行い、地盤を表す平面ひずみ要素毎の収束物性値を求め、それを物性値とした上下動による線形解析(ケース3)との比較を行う。1次元地盤応答解析の収束結果を用いたケースでは地盤物性値が水平方向に一样であるが、FEM解析による収束結果を用いると、あらかじめ水平方向の地震動による地中構造物付近の地盤への影響を取り入れた地盤物性値を用いることができる。図12および13にケース1とケース3の最大応答加速度と最大応答変位の比較を示す。両図を比較して、以下の諸点が読み取れる。

- ①加速度、変位ともに構造物の影響が大きいのは、ケース1の方である。すなわち、ケース3における加速度および変位の深さ方向分布は滑らかな曲線で表されている。
- ②測線の違いによる応答値の差は、ケース3の方が大きく、かつ規則性がある。
- ③構造物位置の値に関しては、加速度、変位ともにケース3の方が5%程度大きく出ているが、大きな差ではない。

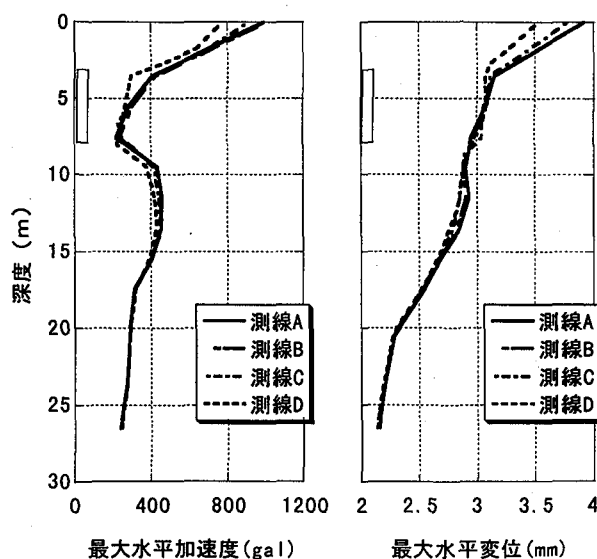


図14 ケース2の応答結果

5. 2 水平動と上下動の比較

図14は水平動を入力したときのFEMモデルによる水平方向の2次元応答解析結果（ケース2）を示している。ただし鉛直方向の応答結果については小さいため省略している。前節に示したケース3の上下動入力ときの増幅傾向と比較して、以下のことが言えよう。

- ①ケース2の水平加速度の増幅は地盤特性と構造物の影響を受けているが、鉛直加速度の増加は滑らかであり、それらの影響は受けていない。
- ②ケース2の加速度増幅の方が著しく、底面の最大応答加速度から比較すると4倍以上に増幅している。一方ケース3ではケース2に比べて倍率は低く、2倍程度の増幅である。
- ③水平動による変位の増幅は上下動の増幅より大きい。水平動入力の場合は変位の増幅が底面と地表では1.8倍程度であるが、上下動入力の場合には1.2倍程度である。

5. 3 地震動波形の差異による影響の検討

次に地震動波形の差異が地盤に対してどのような影響を及ぼすかについて検討する。

前述までの解析結果では大洗観測地震波を増幅させた地震波を用いてきた。この地震波は水平方向の最大加速度が454gal、鉛直方向が158galであり、水平動が卓越している。本節で比較の対象とした兵庫県南部地震の神戸大学波は、水平方向が305gal、鉛直方向が445galと大洗波とは逆に上下方向の地震動が卓越している。

図15に神戸大学の上下動の地震波を用いた場合（ケース6）の、鉛直方向の最大応答加速度と最大変位を示す。解析条件はケース3と同様に、先に水平動入力の2次元FEM解析（ケース5）を行い収束物性値を求め、その結果を用いて上下動入力の線形解析（ケー

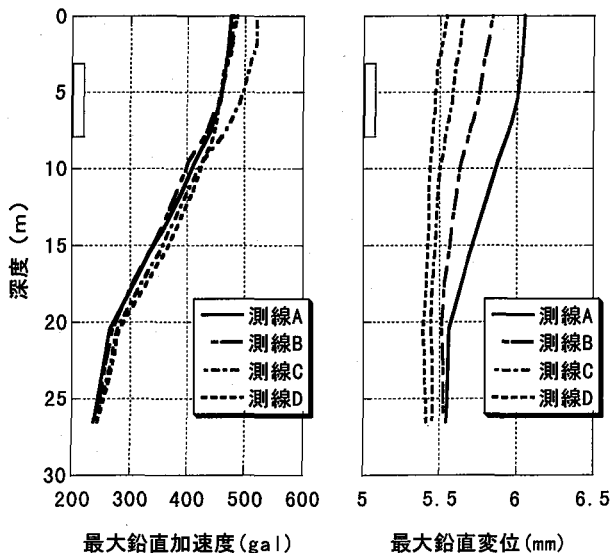


図15 ケース6の応答結果

ス6)を行った。

解析結果の傾向としてはケース3とほぼ同じで、底面粘性境界付近は自由地盤でも地中構造物の直下点でも比較的差がない。大洗波を用いたケース3と比較すると、最大加速度についてはともに2倍程度の増幅を示しているが、最大変位については0.5mm程度の増幅にとどまっている。すなわち水平動では地盤のせん断変形により相対変位が大きくなるが、上下動による鉛直方向の変位は、せん断変形よりも軸ひずみにより変形する。軸ひずみに対する剛性はせん断剛性よりも高いため、鉛直方向の変位が小さいと思われる。

5. 4 同時入力との比較

本節では、神戸大学波の同時入力の場合の応答結果の考察を行う。同時入力は水平動または上下動の単独入力よりも地盤の実現象に近いものと思われる。図16にケース5の最大水平加速度と最大水平変位を、図17にケース7の最大変位の分布図を示す。水平変位を比

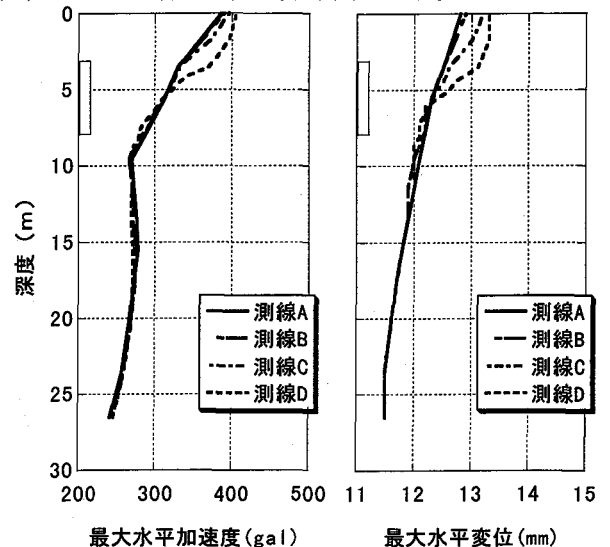


図16 ケース5（神戸大学水平動）の応答結果

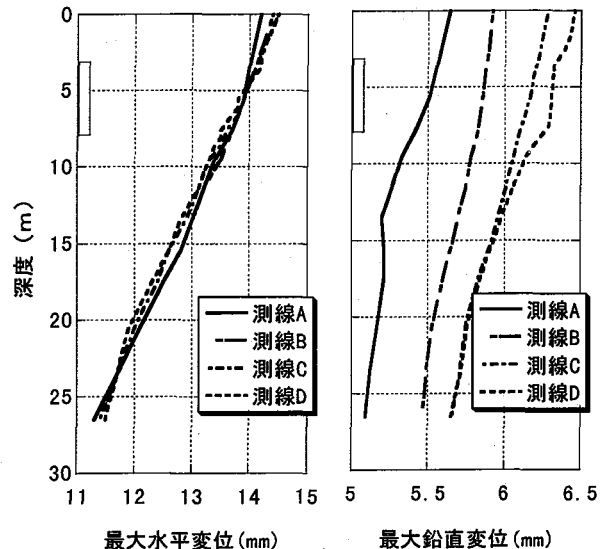


図17 ケース7（神戸大学同時入力）の応答結果

較すると、ケース5では測線Dが他の測線に対して地中構造物底面以浅で若干大きくなっているのに対して、ケース7ではほとんど差がない。構造物上下の相対変位の大きさについては、ケース5では1mm程度、ケース7では0.7mmと同時に入力の方が小さい。次に鉛直変位をケース6とケース7で比較すると、測線に対し、値のばらつきが大きいことが知られる。上下動単独の場合測線Dが小さく、同時入力の場合は逆に測線Dは最も大きい。鉛直変位の大きさは構造物位置で上下入力の場合5.5mm程度に対し、同時入力の場合6.3mm程度と、同時入力の方が上下動の単独入力より鉛直変位が大きくなっている。以上より、単独入力と同時入力とは変位分布に差異が生じるため、実現象を厳密に把握するためには同時入力による解析が必要と思われる。

5. 5 構造物の増分断面力を用いた比較

前節までは最大応答加速度と最大応答変位の比較を行ってきたが、本節では地中構造物に発生する地震時増分断面力の比較を行う。着目断面力は軸力、せん断力、モーメントの3つである。増分断面力が最も大きくなるとされる構造物の隅角部(図18)位置に着目して増分断面力を抽出した。図19、20、21に軸力、せん断力、曲げモーメントの増分断面力をそれぞれ比較する。地震動波形の差異を見るため、ケース2～4(大洗波)とケース5～7(神戸大学波)に分けて示している。また常時荷重との比較のために、自重解析の結果を付け加えている。

考察は、①水平動入力と同時入力の差、②水平動と上下動それぞれ単独入力時の差、③上下動入力と自重解析との差に着目して行う。図からの考察によれば次の3点が言える。

- ①ほとんど全ての箇所と断面力において、同時入力の方が水平動単独入力より大きい。
- ②水平動単独入力るときには生じなくて上下動単独入力るとき生じるものは、中壁の軸力、頂版中央のせん断力である。

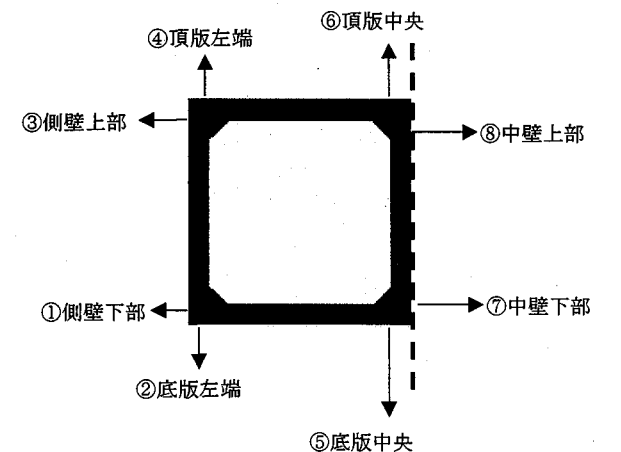


図18 隅各部名称

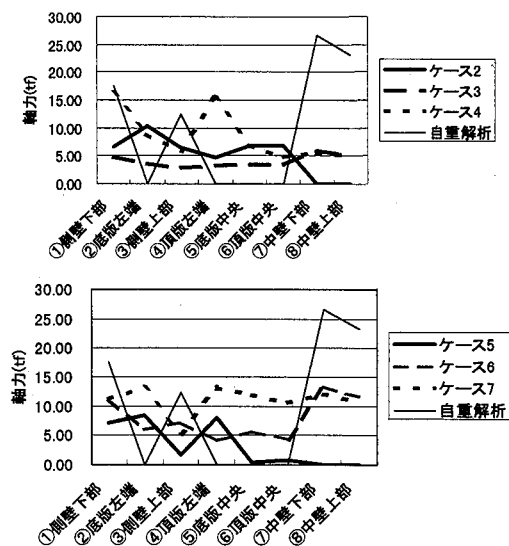


図19 増分断面力(軸力)

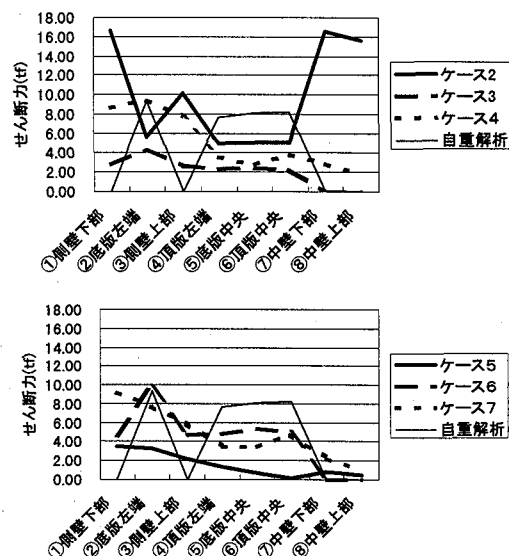


図20 増分断面力(せん断力)

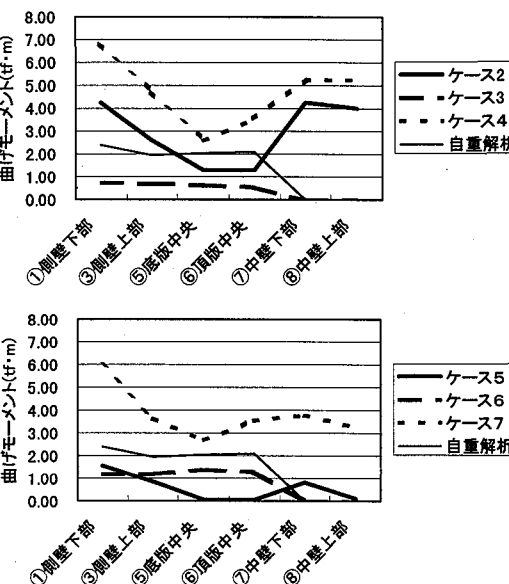


図21 増分断面力(曲げモーメント)

③上下動による増分断面力の大きさは、自重解析の40%を超えている場合もある。

以上のように増分断面力について考察を加えたが、一般的な地中構造物の耐震設計では、常時荷重および水平動の動的解析結果を基にしていることから、この両方で考慮できない発生断面力については、同時入力による動的解析により考慮する必要があると思われる。

6. 結論

以上の解析結果より次のことが分かった。

1) 固有値解析によれば、水平変位は1次モード、鉛直変位は6次モードが卓越する。また、4次モード以上の固有周期に構造物の影響が生じるが地盤のみの場合と比較してその差はわずかである。

2) 上下方向の線形解析において、1次元の地盤応答解析の収束値を用いた場合と2次元のFEMモデルの解析結果を用いた場合を比較すると、加速度、変位の値はともに5%程度2次元モデルの結果の方が大きい。その差はわずかであるが、より詳細に地中構造物の影響を取り入れるためには2次元の解析結果を用いることが必要と思われる。

3) 水平動の等価線形解析と上下動の線形解析の結果の比較によれば、水平方向に加震したときの水平加速度の増幅は、鉛直方向に加震した場合の鉛直加速度の増幅より大きく2倍程度の差が出ている。また最大変位の増幅では、水平動によるせん断変形により変位の増幅が生じているが、鉛直方向の変位は水平方向の変位と比較して小さく、上下動による鉛直方向の変位の増幅はほとんど生じない。

4) 大洗と神戸大学の2種類の地震波による上下動の増幅を見ると、両者の差は小さい。すなわちともに加速度の増幅は2倍程度であるが、鉛直変位の増幅は0.5mm程度である。

5) 同時入力結果と水平動・上下動の単独入力の変位分布に差異が生じた。

6) 構造物の増分断面力による比較では、同時入力時の断面力が大きくなること、上下動によって中壁の軸力や頂版のせん断力が発生し、それらは自重解析の結果と比し無視できないことが知られた。

以上のように、上下動単独、水平動単独および同時入力の解析結果を比較することにより、上下動入力の影響を明らかにすることができた。その結果、一般的に行われている水平動のみによる地中構造物の耐震設計から、上下動をも考慮した耐震設計が必要であるとの認識にいたった。

最後に、本解析では地盤は等価線形解析により非線形性を考慮したが、地中構造物については線形として扱った。しかし、より正確に構造物の断面力を把握するためには、構造物の非線形性を考慮する必要がある。

謝辞

本解析にあたって使用した神戸大学の地震波形は関西地震観測研究協議会提供によるものである。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) (社)日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針 (JEAAG4601-1987), 昭和62年8月
- 2) 藤堂他：堆積地盤における上下地震動の特性と Q_p 構造, 日本建築学会構造系論文集, 第475号, PP45～54, 1994.
- 3) 蛇沢他：自然地震動を利用した機器免震確認試験計画, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, 第1分冊, pp309～312, 1997.
- 4) 土木学会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計に関する安全性照査マニュアル, 平成4年9月.
- 5) 伊東他：鉛直アレー観測加速度波形に基づく鉛直方向成分の増幅特性, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, 第1分冊 pp1235～1240, 1998.

(1998年9月18日受付)