

地下構造物の断面力に与える鉛直地震動の影響について

The effect of the vertical ground motion on the sectional forces of the underground structure

伊東守*, 大塚久哲**, 豊永臣悟***

Mamoru Itoh, Hisanori Otsuka, and Shingo Toyonaga

* 佐藤工業株式会社, 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)>

** 工博, 九州大学教授, 大学院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, during the 1995 Hyogoken Nanbu Earthquake, many underground structures were influenced by vertical seismic motions. This paper discusses the effect of the vertical seismic motions on the sectional forces of the underground structures. To evaluate this effect, 2-Dimensional dynamic FEM analysis is carried out, considering different conditions, i.e. linear or nonlinear properties of soil and underground structure, and the direction of input waves, horizontal or simultaneous excitation.

Key Words : underground structure, vertical seismic motions, simultaneous excitation, nonlinear dynamic FEM analysis

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が、地下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となどから、多くの鉛直地震動に関する研究が行われており^{例えば1), 2)}、筆者らも鉛直アレー観測記録を用いた鉛直地震動の増幅特性に関する研究³⁾や鉛直地震動が地下構造物やその周辺地盤に与える影響⁴⁾について検討を行ってきた。

一般的な地下構造物では、常時荷重及び水平地震動を想定した地震時荷重の足し合わせにより耐震設計が行われているのが現状であり、鉛直方向については重力加速度による鉛直荷重を考慮して設計された部材は鉛直方向に十分な強度を有していると思われ、直下地震等による鉛直地震動は考慮されていない。

また、地下構造物の耐震設計に用いられている応答変位法についても水平地震動による地盤のせん断変形を基にした変位を地震力として評価しているため、鉛直地震動を考慮しているとは言えない。

本研究では、地盤および地下構造物の非線形を考慮した二次元FEMによる時刻歴応答解析を行い、鉛直地震動が

地下構造物の断面力に与える影響の評価を目的として検討を行った。なお地下構造物の断面力は、地上構造物とは異なり地盤の変形に追従することが多く、周辺地盤の影響を無視できないため、地盤をFEM、構造物を骨組でモデル化し、周辺地盤に一次元波動法による収束物性値を用いる場合と、履歴曲線を用いた非線形解析の2つのケースを設定した。また構造物についても線形・非線形の両方の解析を行い、より詳細な断面力の検討を試みた。

2. 入力地震動および対象構造物

2.1 解析対象地盤および入力地震動

本研究では、鉛直アレー観測が行われている日本原子力研究所大洗サイトの地盤を対象とした。表1に大洗サイトの地盤物性値を、図-1にせん断波速度分布図を示す。

入力地震動については、規模の大きな鉛直地震動として、兵庫県南部地震における神戸大学の地表観測波(2E)を用いた。図-2に神戸大学観測波の水平動と鉛直動の時刻歴加速度波形を示す。

また、本解析の地下構造物は原子力発電所の海水管ダクトを想定しており、原子力分野における耐震設計を行う必要がある。したがって参考文献⁵⁾に基づき、地震レベルは設計用限界地震(S_2)を想定して、大洗サイトの特性や過去の地震を考慮した目標スペクトルに適合する地震波を、一

様乱数の位相を用いて作成した。

対象地盤である大洗サイトでは1987年から鉛直アレー観測が行われており、多くの観測記録が得られている。表-1に示すように、この地盤において、深度別4箇所地震計が設置されており、観測位置の最深点はGL-173mである。この地点のせん断波速度が700m/sと硬質な地盤であることから、この鮮新統と中新統の層境界を基盤と見なし、先に作成した設計用限界地震(S₂)をこの点における地震動(2E)とした。

ただし、FEMで想定している地盤は解放基盤ではないため、別途に入力する地震動を作成する必要がある。大洗地盤を一次元波動法によりモデル化し、見和層と石崎層の層境界(GL-28.1m)で地震波を抽出し入力地震動(2E)として解析に用いた。以下この設計用限界地震(S₂)を基に作成したFEM入力用地震波をS2地震波と呼ぶことにする。図-3にこのS2地震波の時刻歴加速度波形を示す。ただし、鉛直地震動については明確な規定がないため、本研究では水平地震動の1/2としたので、グラフは省略する。神戸大学波とS2地震波のフーリエスペクトルを図-4に示す。

表-1 大洗地盤の物性値

TP (m)	地層	地震計設置位置	土層厚 H (m)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 Vs (m/s)	せん断弾性係数 G (kN/m ²)	ポアソン比 ν
+36.5	ローム層	No. 4 -O- (GL -1.2m)	4.57	13.0	170	38220	0.48
+33.8			5.40	18.8	350	235200	0.42
+28.4			1.50	17.1	300	156800	0.45
+28.9			6.20	18.0	430	340060	0.40
+20.7	見和層		1.90	17.5	490	430220	0.40
+18.8			2.60	17.4	450	360640	0.39
+18.2			6.01	19.8	610	751660	0.38
+10.2			12.39	19.8	430	373380	0.46
-2.2	石崎層	No. 3 -O- (GL -32.1m)	1.10	18.5	370	258720	0.47
-3.3			25.50	18.6	370	259700	0.47
-28.8			6.30	17.9	390	278320	0.47
-35.1			12.40	19.4	440	383180	0.46
-47.5	鮮新統	No. 2 -O- (GL -95.2m)	1.40	21.1	510	559580	0.45
-48.9			4.79	19.8	500	505680	0.45
-58.69			46.31	17.5	480	412580	0.45
-100.0			23.60	17.8	580	612500	0.43
-118.9	中新統	No. 1 -O- (GL -173.6m)	11.63	17.7	620	695800	0.43
-135.23				19.4	1010	2019780	0.36

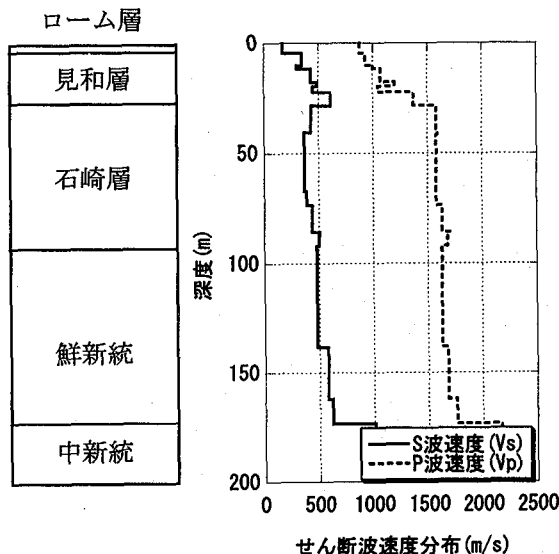


図-1 大洗の地盤のせん断波速度分布

2.2 対象地下構造物

地下構造物は、原子力発電所施設の海水管ダクトを用いた。形式は、参考文献⁹⁾の例示設計編で用いられている2連RCボックスカルバートである。表2に地下構造物の諸元を示す。

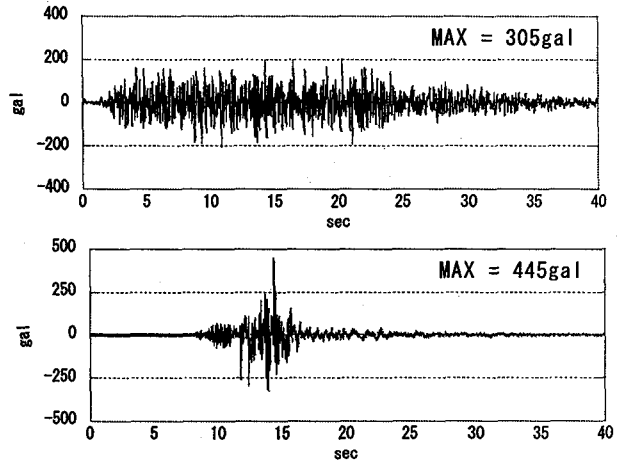


図-2 神戸大学波 (上段: 水平, 下段: 上下)

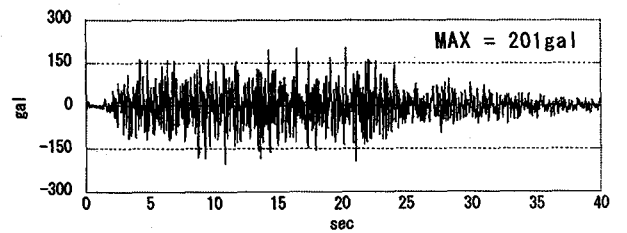


図-3 S2地震波

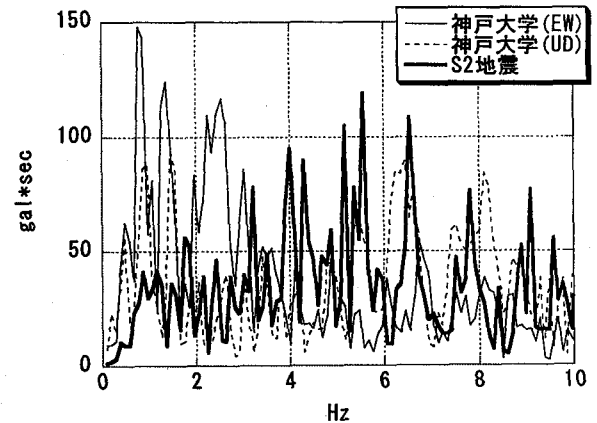


図-4 フーリエスペクトル

表-2 対象地下構造物の諸元

密度	(kN/m ³)	24.0
ポアソン比		0.167
弾性係数	(kN/m ²)	2.45×10 ⁷
減衰定数	(%)	5
断面積	(m ²)	0.4
断面2次モーメント	(m ⁴)	0.00533
コンクリートの圧縮強度	(kN/m ²)	23520
鉄筋の圧縮強度	(kN/m ²)	343000

3. FEMによる解析

本解析では、表-1に示す大洗サイトのローム層と見和層 (GL-28.2m) までの地盤を、ローム層を地下構造物の土かぶりとして、地盤は平面ひずみ要素、地下構造物ははり要素としてFEMでモデル化した。図-5にFEMモデル図を示す。ただし、境界条件は底面、側方ともに粘性境界である。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。

3.1 固有値解析結果

図-5のFEMモデルによる固有値解析結果を表-3に示す。ただし、鉛直地震動を考慮するため、側方境界をフリーとして解析を行った。この固有値解析結果より、1次モードは水平モードであるが、6次モードで鉛直モードが発生していることがわかる。図-6に地下構造物の1次と6次のモード図を示す。

3.2 自重解析による断面力

まず地震荷重を考慮しない常時の状態における断面力を調べるために、自重解析を解析を行った。図-7,8に常時荷重における地下構造物の単位奥行きあたりの断面力図 (軸力、曲げモーメント) を示す。

この図より、常時の軸力は床版よりも鉛直材、特に中壁で大きいこと、常時の曲げモーメントは、中壁上部や下隅角部で大きくなっていることがわかり、これらの箇所における鉛直地震動の影響について、詳細な検討が必要と

表-3 固有値解析結果

モード次数	固有周期 (s)	有効質量比 (%)	
		水平方向	鉛直方向
1次	0.255	66.0	0.0
2次	0.200	0.0	5.6
3次	0.142	6.1	0.0
4次	0.121	0.0	3.6
5次	0.116	2.0	0.0
6次	0.113	0.0	25.9
7次	0.108	7.0	0.0
8次	0.104	0.0	1.6
9次	0.100	0.6	0.0
10次	0.089	0.0	6.1

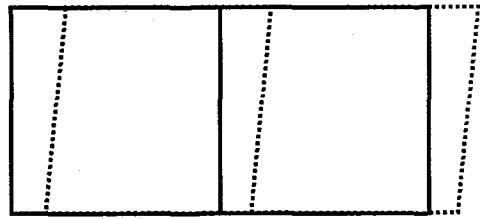


図-6 モード図 (上段:1次, 下段6次)

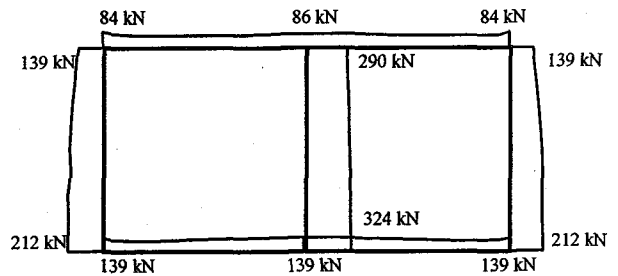


図-7 常時荷重による断面力 (軸力)

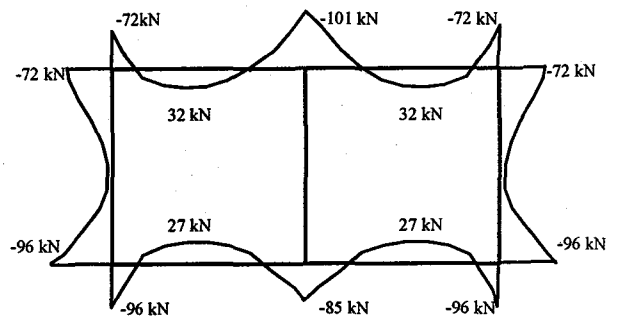


図-8 常時荷重による断面力 (曲げモーメント)

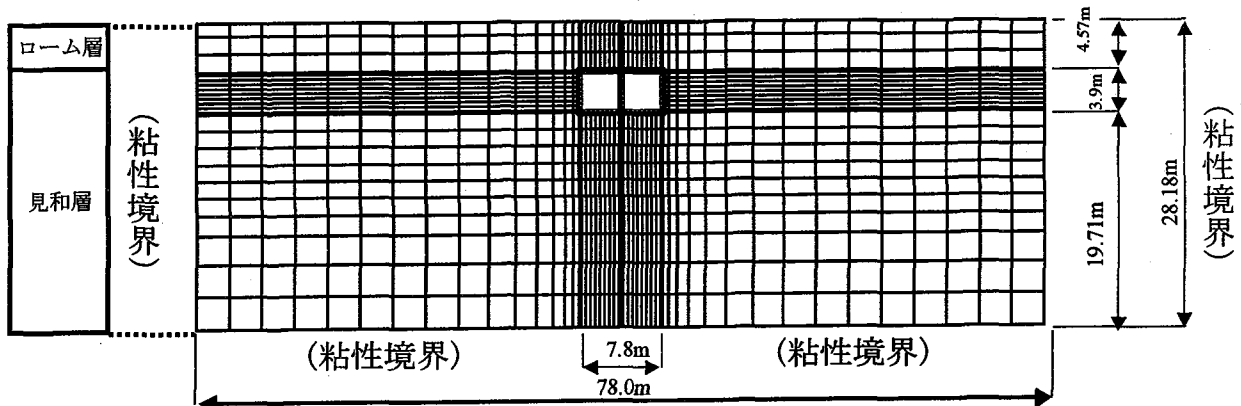


図-5 解析対象FEMモデル

表-4 解析ケース

解析ケース	地震波	加震方向	地盤	構造物
CASE 1	神戸大学波	水平	収束物性値 (線形)	線形
CASE 2	神戸大学波	水平	収束物性値 (線形)	非線形
CASE 3	神戸大学波	水平	非線形	線形
CASE 4	神戸大学波	水平	非線形	非線形
CASE 5	神戸大学波	同時	収束物性値 (線形)	線形
CASE 6	神戸大学波	同時	収束物性値 (線形)	非線形
CASE 7	神戸大学波	同時	非線形	線形
CASE 8	神戸大学波	同時	非線形	非線形
CASE 9	S2地震波	水平	収束物性値 (線形)	線形
CASE 10	S2地震波	水平	収束物性値 (線形)	非線形
CASE 11	S2地震波	水平	非線形	線形
CASE 12	S2地震波	水平	非線形	非線形
CASE 13	S2地震波	同時	収束物性値 (線形)	線形
CASE 14	S2地震波	同時	収束物性値 (線形)	非線形
CASE 15	S2地震波	同時	非線形	線形
CASE 16	S2地震波	同時	非線形	非線形

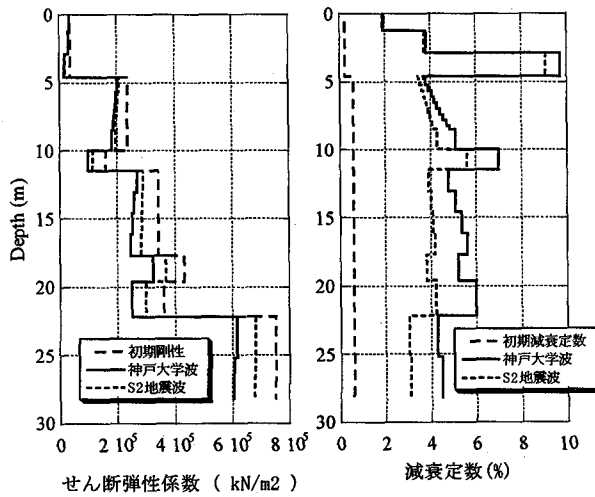


図-9 地盤の収束物性値

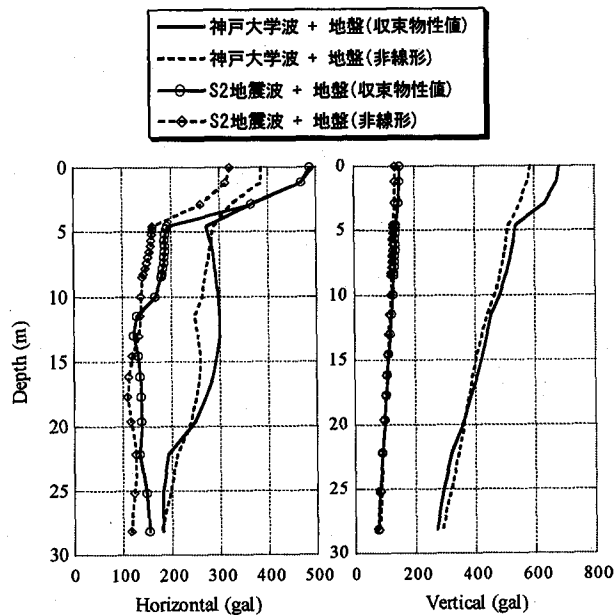


図-10 自由地盤最大加速度分布

思われる。

3.3 解析ケースについて

解析は時刻歴応答解析によるものとし、先に述べた2つの地震波をFEMの下端に粘性境界を通して入力する、計16ケースの解析を行った。表-4に各ケースの概要を示す。全ケースにおいて、先に行った常時荷重による静的解析結果を加えて動的解析を行うものとした。まずCASE1~4 (CASE9~12)では従来の耐震設計手法に従い、水平動のみによる地震力を考慮し、残りのケースでは、水平動と鉛直動の両者による同時入力を想定している。ただし、構造物に与える地盤の非線形性の影響を検討するため、一次元波動法解析による収束剛性を地盤物性として用いる場合(線形)と、せん断応力-せん断ひずみ関係に非線形履歴モデルの修正Ramberg-Osgoodモデルを用い、せん断剛性の低下により軸方向の剛性低下も考慮した、2種類の地盤のケースを想定した。図-9に一次元波動法解析による地盤の収束値(せん断弾性係数、減衰定数)を示す。また減衰はレーリー減衰を用いた。

地下構造物自体についても、断面力の時刻歴変化や剛性の低下などに伴う詳細な断面力の変化を見るために、線形解析と非線形解析を行うことにした。構造物の非線形履歴モデルには、骨格曲線がトリリニアである武田モデルを、 $M-\phi$ 関係は参考文献⁷⁾のコンクリート、鉄筋材料特性曲線を用いた。なお解析の時間刻みは0.001秒とし、構造物の隅角部は剛域を考慮し線形部材として解析を行った。

4. 解析結果の検討

4.1 地盤の最大加速度増幅

各解析ケースにおける、側方自由地盤の最大加速度増幅を図-10に示す。このグラフより、収束剛性を用いた地盤(線形)の方が、地盤を非線形とした場合よりも水平動の加速度増幅が大きくなっていることがわかる。特に剛性が大きく変化するローム層と見和層の層境(GL-4.6m)で増幅が大きくなっている。上下動の増幅では、神戸大学波が445gal、S2地震波が100galと入力地震波の規模が異なることもあり、FEMモデル下端に入力した時点で200galの差異がある。加速度が大きい神戸大学波の増幅が大きく、地表面では両者で500gal程度の加速度の差異が生じている。地盤を収束物性値による線形とした場合と非線形とした場合の鉛直動の増幅の比較では、神戸大学波を入力したケースにおいてローム層より浅い地表付近で両者に増幅の差異が見られるものの、他の深度やS2地震波ではほぼ同じ増幅傾向を示している。

4.2 最大断面力による評価

図-11に神戸大学波を用いた解析ケースによる最大断面力(軸力、せん断力、曲げモーメント)の比較を示す。なお常時荷重による断面力も比較のために加えている。

地震時荷重を加えた場合の軸力増分を見ると、全体的に水平動のみを入力した場合よりも、水平動と上下動の同時入力を行った場合の方が軸力の増加が大きい。同時入力に

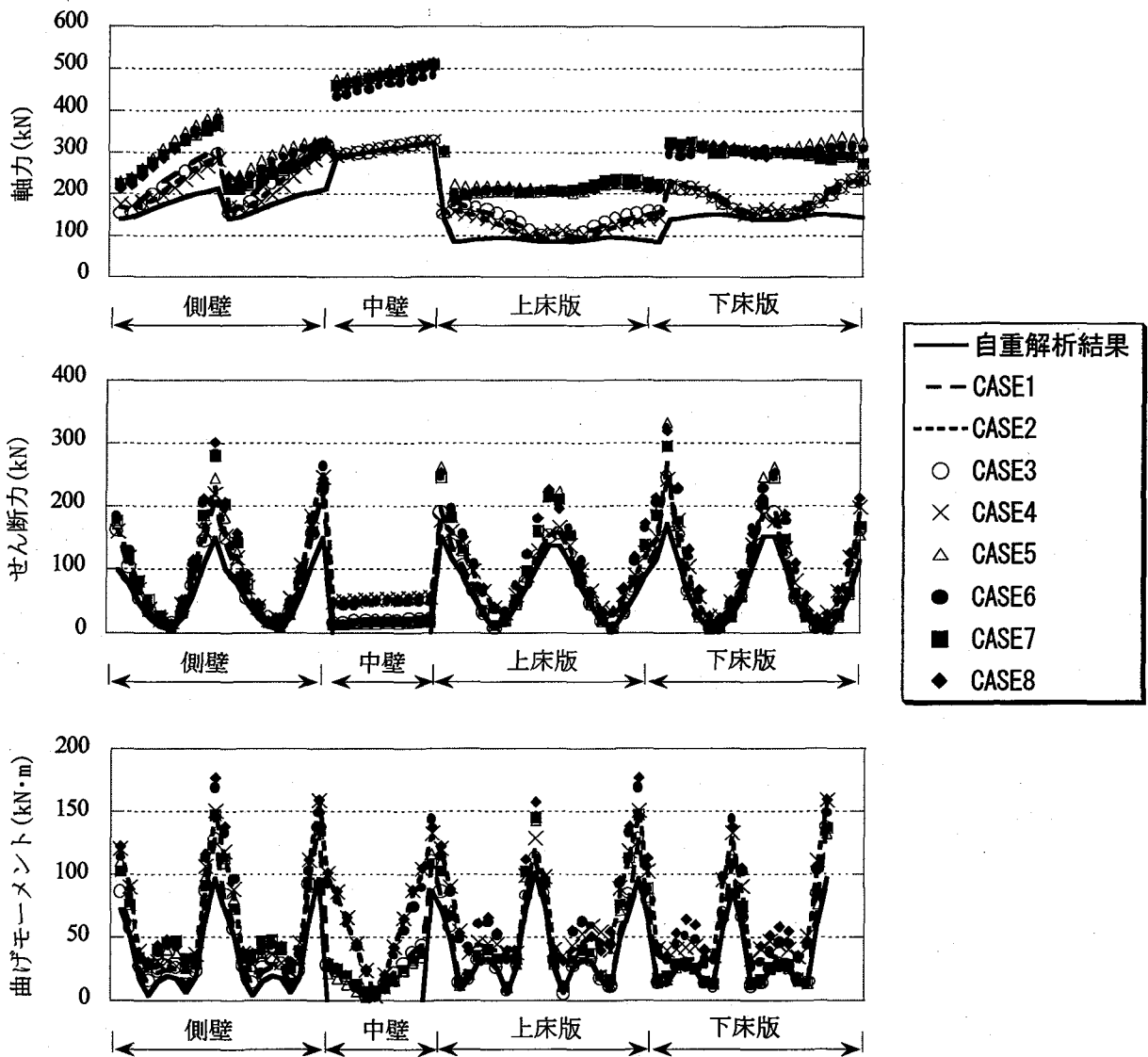


図-11 最大断面力比較(神戸大学波)

(注: CASE1 ~ CASE8の結果は自重解析結果を足した値である。)

よる軸力増加は、上床版・下床版では中央部において、側壁や中壁といった鉛直部材では部材全体にわたって軸力の増加が大きい。全体的には常時荷重のケースと比較して50~100%の軸力増分が見られる。このことから、側壁や中壁といった鉛直部材の軸力増加に鉛直地震動が大きく関わっていることがわかる。図-12に、神戸大学波の同時入力により軸力が増加している部材の時刻歴を示す。水平動のみを入力したケースでは軸力がほとんど変化していないのに対して、同時入力では約200~400(kN)の間で大きく変化している。また、この軸力の時刻歴変化は、神戸大学波の鉛直動の時刻歴加速度波形とピーク時間などが対応しており、鉛直部材の軸力に鉛直地震動が影響を及ぼしていることが明らかである。また、同時入力の4ケースでの軸力の変化を比較すると、ほぼ同じ形状を示している。この理由として(1)地盤を非線形としたケースでは、水平動により十分に地盤のせん断剛性が低下しており、収束物性値を用いたケースとほぼ同じ地盤状況であったこと、(2)構造物の非線形性が小さく、構造物が充分

塑性化していないこと、の2つが原因として考えられる。

次に部材別に見ると、側壁では下端部で、床版では両端部で地震時の軸力増加が見られるが、中壁は前述の同時入力による軸力増加を除けば、ほとんど増加していない。

せん断力、曲げモーメントについても側壁や中壁、床版の端部において、地震時断面力の増分が見られる。特に、側壁や下床版の端部では常時荷重と比べて非常に大きな曲げモーメントが発生している。

4.3 構造物非線形解析結果の検討

次に構造物を非線形として解析を行った結果に着目して検討を行う。表-4に示す計16ケースのうち、構造物を非線形とした解析は8ケースである。これら8ケースの結果より、構造物の曲げモーメントが部材のひび割れ曲げモーメントを越えている部材箇所を図-13に、各ケース毎のひび割れ発生箇所を表-5に示す。

まず全解析ケースを通して、床版の両端部、側壁下部といった隅角部においてひび割れが発生していることがわか

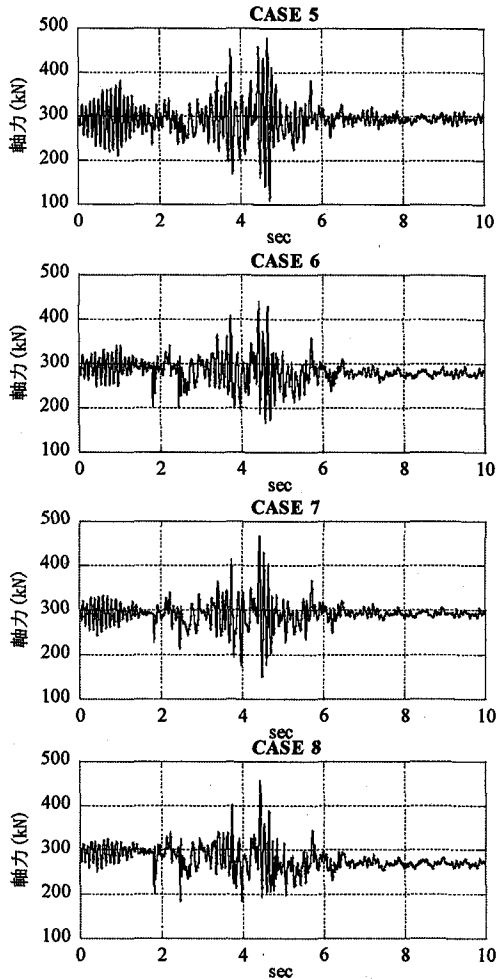


図-12 軸力の時刻歴変化(中壁上部)

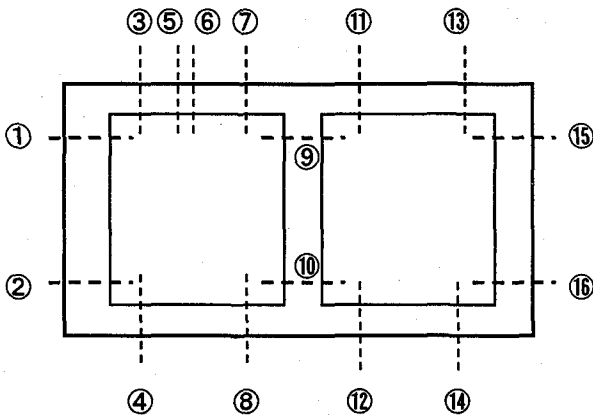


図-13 ひび割れ発生位置

表-5 解析ケース別のひび割れ部材

	CASE2	CASE4	CASE6	CASE8	CASE10	CASE12	CASE14	CASE16
部材①	○	○			○	○	○	○
部材②	○	○	○	○	○	○	○	○
部材③	○	○	○	○	○	○	○	○
部材④	○	○	○	○	○	○	○	○
部材⑤			○	○			○	○
部材⑥				○				○
部材⑦	○	○	○	○	○	○	○	○
部材⑧	○	○	○	○	○	○	○	○
部材⑨	○	○	○	○	○	○	○	○
部材⑩	○	○	○	○	○	○	○	○
部材⑪	○	○	○	○	○	○	○	○
部材⑫							○	○
部材⑬	○	○	○	○	○	○	○	○
部材⑭	○	○	○	○	○	○	○	○
部材⑮							○	○
部材⑯	○	○	○	○	○	○	○	○

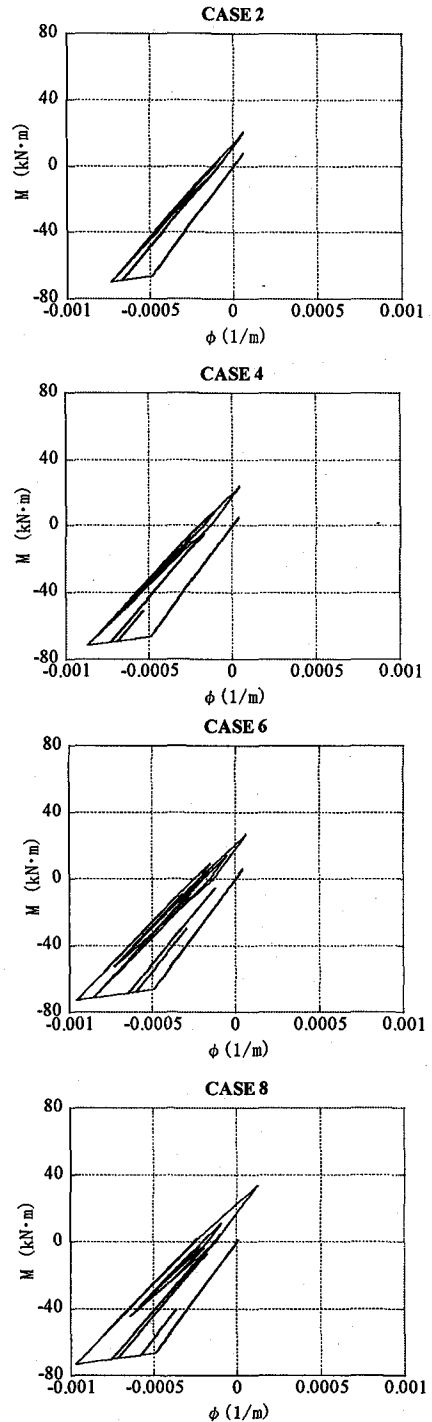


図-14 M-φ履歴曲線(側壁下部)

る。本解析では、隅角部を剛域と見なして線形部材としたため、隅角部に隣接する部材でひび割れが生じている。すなわち、水平動を入力することにより、構造物が地盤のせん断変形の影響を受け、部材端部の曲げモーメントが増加していることがわかる。ここで、各解析ケースの地盤の条件に着目すると、収束物性値を用いた線形解析と地盤を非線形とした解析では、ひび割れ箇所にほとんど差が見られない。同様に神戸大学波(CASE2~CASE8)とS2地震波(CASE10~12)を入力した場合には、地震波の差異による影響もほとんど見られないが、ケース別に見ると水平動と鉛直動を同時に入力したケース(CASE8, 16)で最も多く

の部材でひび割れが発生していることがわかる。すなわち、水平動と鉛直動による同時入力を行い、より実挙動に近い解析を行うことで、損傷箇所の予想が可能であることがわかった。また、部材⑤、⑥のひび割れは、水平動のみを入力したケースでは発生しておらず、同時入力を行ったケースで発生しており、上下動の影響が伺える。

次に、コンクリートのひび割れが発生している側壁下部のM- ϕ 履歴曲線を図-14に示す。

CASE2, 4, 6, 8の全ケースともにコンクリートのひび割れを超えた範囲での挙動を示しているが、鉄筋の降伏までには至っていない。水平動のみの入力のケース(CASE2, 4)と同時入力のケース(CASE6, 8)を比較すると、ともにコンクリートのひび割れと鉄筋降伏の間で履歴を描いているが、同時入力のケースの方が若干ではあるが、非線形性が大きく出ている。

5. 結論

本文では、地下構造物の断面力に鉛直地震動がどのように影響を与えるかについて、地盤・地下構造物を線形、非線形のケースに分けて検討を行った。以下にそれらの解析から得られた知見をまとめる。

(1) 固有値解析では、1次で水平のモードが、6次で鉛直のモードが発生している。

(2) 常時荷重における断面力では、側壁や中壁といった鉛直部材に軸力が多くかかり、隅角部に曲げモーメントが集中している。

(3) 最大断面力の比較において、軸力が明らかに鉛直地震動の影響を受けているケースが見うけられた。また、断面力は側壁や中壁、床版の端部において地震荷重による増分が大きくなっていることがわかった。

(4) 構造物の非線形解析より、全体的に隅角部に隣接する部材にコンクリートのひび割れなどの損傷が集中していた。ただし地震波によりその被害の程度が異なり、鉛直地震動を考慮することによって、床版中央にひび割れが発生していた。また水平動のみを入力したケースよりも、明らかに同時入力を行ったケースの方が、ひび割れが発生している部材が多く存在した。

本研究では、鉛直地震動が地下構造物の断面力に与える影響の評価を目的とした。現在一般的に行われている耐震設計に基づき、地盤は収束物性を用いて線形として、構造物も線形としたケースから、もっとも実現象に近い

と思われる、地盤・構造物の非線形解析まで様々なケースを想定して解析を行ったが、構造物の非線形性が小さかったことなどから、構造物の非線形性による影響よりもむしろ地震動を単独で水平動のみ考慮するか、水平動と鉛直動を同時に入力するかによって結果が大きく異なっていた。特に鉛直部材の軸力の地震時増分については明らかに鉛直地震動の影響によるものと思われる。

非線形部材の耐力は厳密には軸力と曲げモーメントの相関を考慮する必要があり、今後これらを考慮に鉛直地震動による詳細な断面力の検討を行う予定である。

謝辞

本解析にあたって使用した神戸大学の地震波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。

参考文献

- 1) 藤堂正喜, 羽鳥敏明, 千葉脩, 高橋克也, 武村雅之, 田中英朗: 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, 1995.
- 2) 矢的照夫, 梅原俊夫, 青木一二三, 中村晋, 江崎順一, 末富岩雄: 兵庫県南部地震による神戸高速鉄道・大開駅の被害とその要因分析, 土木学会論文集, No. 537/ I -35, pp303-320, 1996.
- 3) 伊東守, 大塚久哲, 豊永臣悟: 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, 構造工学論文集 Vol. 45A, pp1591-1598, 1999.
- 4) 伊東守, 大塚久哲, 豊永臣悟: アレー観測結果に基づく上下動の特性, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, 第1分冊, pp285-288, 1999.
- 5) 社団法人 日本電気協会, 電気技術基準調査委員会: 原子力発電所耐震設計技術指針(JEAAG4601-1987), 1987.
- 6) 社団法人土木学会, 原子力土木委員会: 原子力発電所屋外重要構造物の耐震設計に関する安全照査マニュアル, 1992.
- 7) 道路橋示方書・同解説(V耐震設計編), 社団法人日本道路協会, 平成8年.
- 8) 伊東守, 大塚久哲, 豊永臣悟, 蛭沢勝三: 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.

(1999年9月17日 受付)