

# 大地震時における大断面地下構造物の 地震応答評価

大保 直人

正会員 工博 鹿島技術研究所 先端技術研究部 (〒182-0036 調布市飛田給 2-19-1)

阪神・淡路大震災以後、大地震時(レベル2)における地下構造物の耐震設計の適用性を検討するために、応答変位法、応答震度法等の適用性検討、並びに線形解析、等価線形解析及び時刻歴逐次非線形解析を用いて地下構造物の挙動解明が実施されている。しかし、軟弱地盤に構築された地下構造物では周辺地盤が液状化した場合の挙動については十分な検討がなされていない。ここでは、対象の液状化地盤として阪神・淡路大震災で記録が得られたポートアイランドを選び、ここに大断面地下構造物が存在すると仮定して、基盤にレベル相当の地震動として最大加速度 500Gal の 3 種類の地震動(ポートアイランド波、八戸波及び正弦波)を入力させた線形解析、時刻歴逐次非線形、及び有効応力解析を実施し、入力地震動及び解析手法の違いによる地盤変位分布及び構造物に作用する断面力の違いを明らかにした。

*Key Words: Underground Structure, Dynamic analysis, Nonlinear analysis, Two-phase nonlinear analysis, Seismic design*

## 1. はじめに

大地震時(レベル2地震動)には、地盤の剛性低下が生じ加速度は小さく、変位は大きくなる傾向にある。レベル2地震動で発生した地盤変位と地下構造物の耐震設計法で定義されている地盤ばねを用いて設計すると構造物に大きな外力が作用する等、課題が多い。阪神・淡路大震災以降、レベル2地震動における地下構造物の耐震評価の妥当性検討を目的として、各種解析法を用いて被害を受けた地下構造物の被害原因の解明、及び地盤・構造物の非線形性を考慮した逐次非線形解析等が実施されている<sup>1)~3)</sup>。しかし、レベル2地震動に対しては液状化の発生可能性がある軟弱地盤に構築される地下構造物の耐震安全性の検討は極めて少ない。

ここでは、軟弱地盤に構築された大断面地下構造物モデルを用い、入力地震動波形をパラメータとした線形解析、時刻歴逐次非線形解析及び有効応力解析を実施し、地盤変位分布及び構造物に作用する断面力の違いについて明らかにした。

## 2. 解析の概要

動的解析は、線形解析と時刻歴逐次応答解析として非線形解析(以後1相系と呼ぶ)と有効応力解析(以後2相系と呼ぶ)の3解析手法を用いた。阪神・淡路大震災で地中、地表の観測記録が得られ、液状化発生が確認されているポートアイランドの地盤を解析の地盤モデルに用いた。

### 1) 解析モデル及び条件

図-1に解析モデルの概要を示した。地盤モデルの幅は、長さ253m、高さ83mとし、地下構造物の大きさは高さ26m、幅30m、壁厚3mを仮定した。3つの解析で用いた地盤は平面ひずみ要素でモデル化し、地下構造物は、はり要素でモデル化した。地盤の境界条件は、底面は3解析方

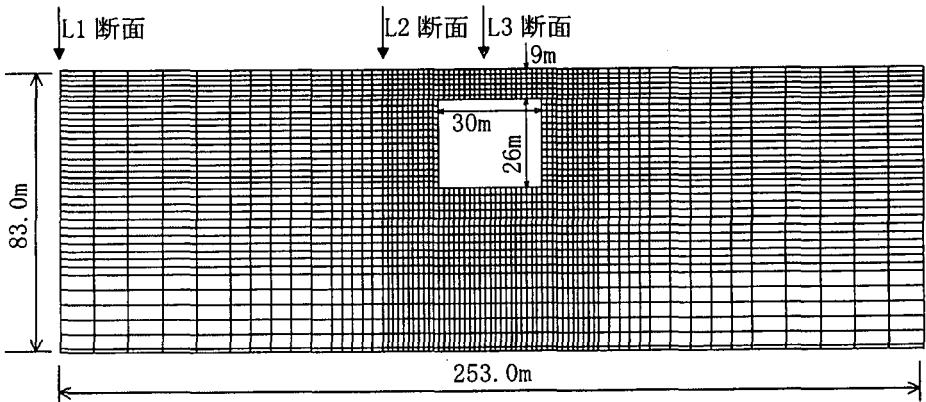


図-1 解析モデルの概要

法とも固定境界、側方境界は解析手法で異なり、線形解析では、エネルギー伝達境界、1・2相系解析では、周期境界（同じ深さにおける節点の変位が同じになるように拘束条件）とした。地盤モデルは、ポートアイランドの観測地点の地盤条件と、表-1に地盤物性値を示した<sup>4)</sup>。

1 相系解析で用いた地盤の非線形モデルは、構成則 Multi-Yield-Surface に基づく塑性理論を用いた。地盤のせん断応力—せん断ひずみ曲線は双曲線とし、最大せん断応力は各地盤層中心位置の拘束圧と摩擦角から算定し、砂質土系の破壊ひずみは、0.06、シルト・粘土系は0.08とした。

2 相系解析<sup>5)</sup>では、地下水位より浅い地盤の非線形モデルは1相系と同じとし、飽和砂質盛土（GL-3m～GL-18m）を2相系非線形材料とし、これより深い地盤は1相系非線形材料を設定した。

## 2) 入力地震動

入力地震動は、神戸ポートアイランド（以降神戸波と呼ぶ）の最深度（GL-83m）で観測された波形、十勝沖地震の八戸波及び解析で用いた地盤モデルの一次固有振動数の正弦波を用い、解析モデルの底面への入力波形とした。レベル2地震動は、検討対象地点の近傍に存在する活断層或いは歴史地震を基に設定する必要があるが、ここでは、3入力地震動の最大加速度を500Galに基準化した地震波形をレベル2地震動と見なして検討に用いた。図-2には、神戸波と八戸波の主要15秒区間の波形を示した。

図-3には、一例として下水道基準における設計速度応答スペクトル<sup>6)</sup>と解析で用いた入力地震動波形の速度応答スペクトルの重ね書きを示した。この図から神戸波は、設計値とほぼ同じ大きさを示し、八戸波やや大きめ、正弦波は、0.6秒以上の周期で設計値を大きく上回り、特に0.9秒付近では約10倍の大きさになっている。正弦波については、加速度・変位の最大値分布のみの評価に用いた。

## 3. 解析結果

### 1) 地盤の加速度・変位の増幅分布

地下構造物の耐震設計においては、地盤中の最大加速度及び変位分布の評価が重要となる。図-4には、図-1に示したL1断面（解析の側方境界）、L2断面（構造物側面から15mはなれた位置）及びL3断面（構造物の中心位置）位置における正弦波入力に対する最大加速度分布、及びL2断面位置での3種類の解析手法で得られた最大加速度分布を示した。線形解析では、評価断面の違いによる最大加速度の分布差はない。1・2相系解析で40m以浅で振幅が小さくなっているのは、大きな非線形性が表れたためである。

図-5には、解析手法と入力地震動の違いによる最大相

表-1 地盤構造

| 深さ<br>(m) | 土質名         | Vs<br>(m/s) | $\rho_s$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|-----------|-------------|-------------|----------------------------------|
| -3.0      | 埋土          | 170.0       | 1.80E+03                         |
| -18.0     | 埋土          | 210.0       | 2.65E+03                         |
| -28.0     | シルト質粘土      | 180.0       | 2.60E+03                         |
| -37.0     | 互層          | 245.0       | 2.50E+03                         |
| -60.0     | 互層（洪積層）     | 305.0       | 2.60E+03                         |
| -82.0     | シルト質粘土（洪積層） | 303.0       | 1.80E+03                         |
| -         | レキ          | 320.0       | 1.80E+03                         |

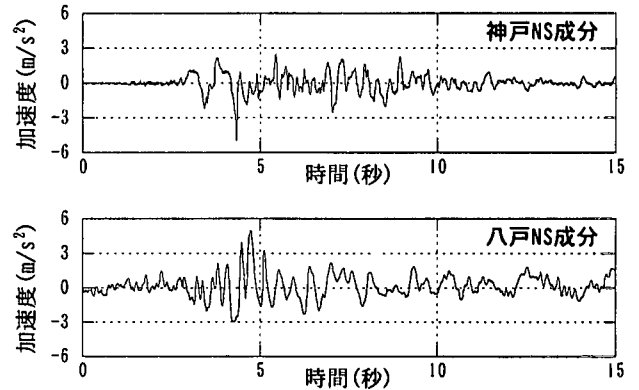


図-2 解析に用いた入力地震動

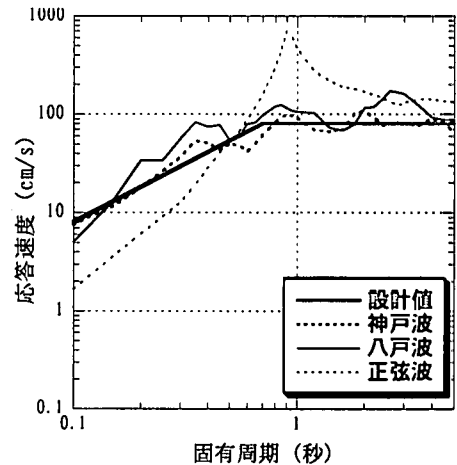
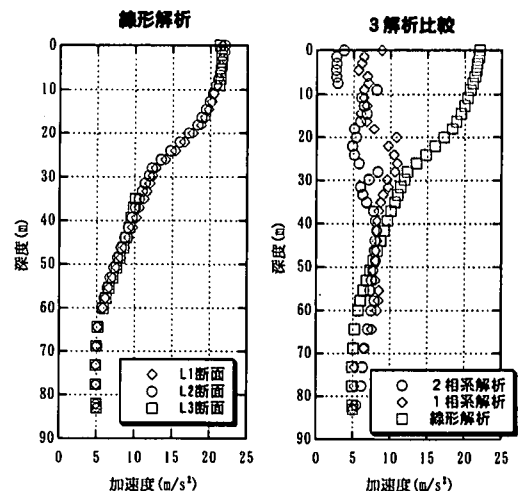


図-3 速度応答スペクトルの比較

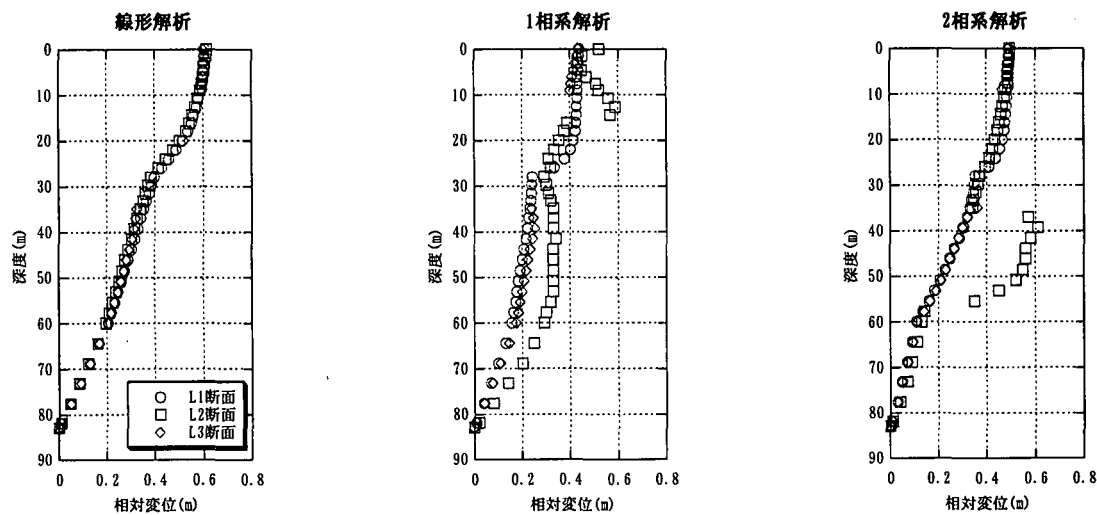


(a) 断面位置での比較 (b) L2断面での比較

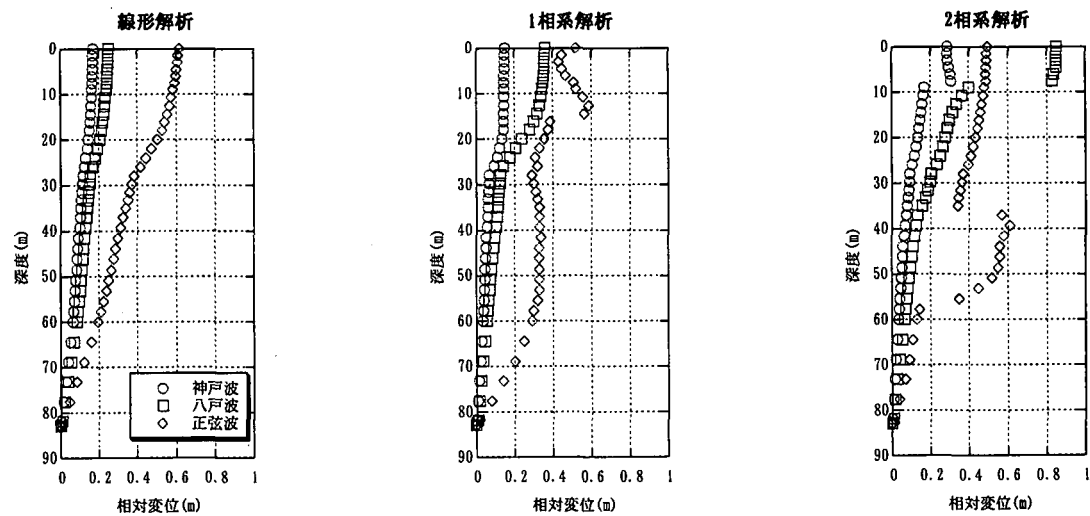
図-4 正弦波入力に対する最大加速度応答分布

対変位分布の比較を示した。正弦波入力での3解析手法の違いによる3断面での最大相対変位分布（図-5(a)参照）は、L1とL3断面は解析手法が異なってもほぼ同じ分

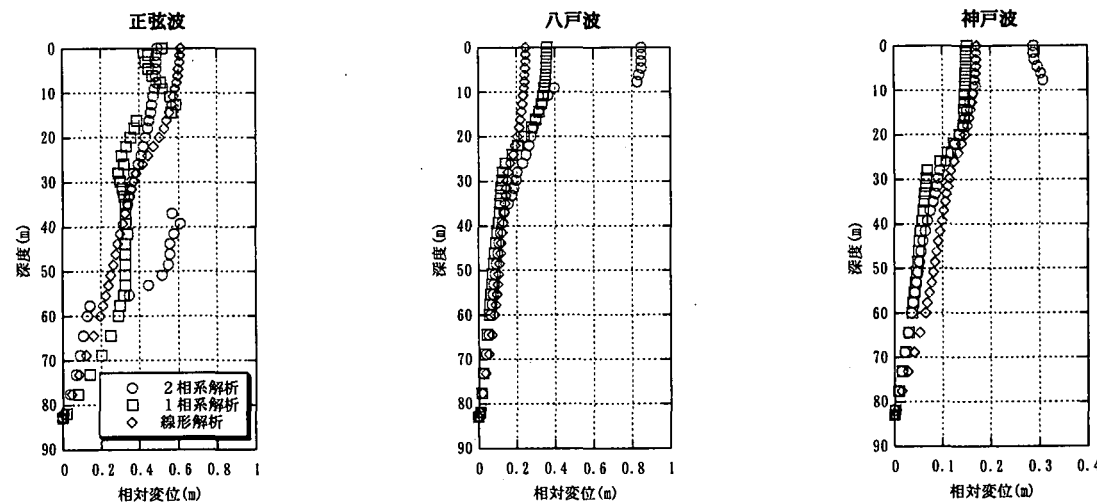
布形状を示しているが、L2断面では、深さ50m付近では1・2相系解析で異なった分布形状を示している。これは、この付近まで、構造物の影響を受けたためと考えられる。



(a) 解析手法の違いによる各断面での最大相対変位分布の比較（正弦波入力）



(b) 入力地震動の違いによる最大相対変位分布の比較（L2断面）



(c) 解析手法の違いによる最大相対変位分布の比較（L2断面）

図-5 最大相対変位分布の比較

入力地震動の違いによる最大相対変位分布（図-5(b)参照）を見ると、地中部では正弦波、八戸波、神戸波の順に小さくなっている。これは、速度応答スペクトル図（図3参照）から分かるように入力レベルが大きいことに起因する。一方、地表最大変位を見ると線形・1相系解析では、地中分布と同じ傾向を示しているが、2相系解析では、八戸波が大きな値を示している。

解析手法の違いによる最大相対変位分布の違いを見ると（図-5(c)参照）、八戸及び神戸波入力では、地表最大変位は、2相系解析で大きくなっている。

応答変位法では、構造物上下端の変位量の評価が重要である。今回の解析で得られたL2・L3断面の構造物上・下端の相対変位の大きさを表-2に示した。線形解析では正弦波入力が必要な値を示しているが、1相系・2相系解析では、L2断面では、八戸波を用いた解析が必要な相対変位を示すが、L3断面では正弦波入力が必要な変位を示す結果となった。

## 2) 設計との比較

図-6には、神戸波と八戸波を入力したケースで側壁に働く断面力（最大軸力、最大せん断力及び最大曲げモーメント）分布の比較を示した。断面力の大きさは1相系解析が最も大きな値を示し、次に2相系となり、地震動の種類としては八戸波を用いたケースで大きな断面力が発生している。

## 4. まとめ

ここでは、軟弱地盤に構築される大断面地下構造物の耐震設計において、重要となる周辺地盤の変位分布及び構造物に発生する断面力が、入力地震動及び解析手法による違いを解析的に調べた。得られた結果を以下にまとめた。

1) 入力地震動の違いによる地盤最大相対変位分布は、地中部では、正弦波入力の相対変位が大きくなった。これは、入力レベルが他より大きかったことに原因する。

表-2 構造物上・下端の相対変位

|     | 線形解析  |       | 1相系解析 |       | 2相系解析 |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | L2断面  | L3断面  | L2断面  | L3断面  | L2断面  | L3断面  |
| 正弦波 | 0.278 | 0.271 | 0.191 | 0.163 | 0.140 | 0.104 |
| 八戸波 | 0.101 | 0.109 | 0.232 | 0.161 | 0.242 | 0.079 |
| 神戸波 | 0.060 | 0.066 | 0.086 | 0.087 | 0.089 | 0.060 |

単位：m

2) 解析手法の違いによる地下構造物上下端の変位差は、線形解析では正弦波入力でも大きく、1・2相系解析では八戸波が最も大きくなった。

3) 地盤の変位分布評価を行なう場合には、構造物の影響を考慮して求める必要がある。

4) 側壁に作用する断面力は、1相系解析が、他の解析より大きく、八戸波入力が神戸波入力より大きくなる結果となった。

ここでは、耐震設計で重要となる地盤変位分布が液化地盤中に存在する地下構造物周辺での基本特性を調べるための基礎検討結果を紹介した。今後、等価線形解析及び応答変位法との比較を行い地盤ばねの評価を実施する予定である。

## 参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会、阪神・淡路大震災調査報告—土木構造物の被害原因の分析—、1999、土木学会
- 2) 高尾他、動的・静的解析手法を用いた共同溝断面方向の被災分析、第25回地震工学研究発表会講演論文集、1999年
- 3) 中村他、地中構造物の地震被害解析に及ぼす計算手法の影響に関する一考察、第25回地震工学研究発表会講演論文集、1999年
- 4) 石原他、土質特性と地盤の挙動、阪神・淡路大震災特集第4回、土木学会誌、1995年
- 5) 宮田他、有効応力解析に用いるMulti-Yield弾塑性モデルの高度化、第36回地盤工学研究発表会、2001年
- 6) 日本下水道協会、下水道施設の耐震対策指針と解析、1997年

(2001年5月25日受付)

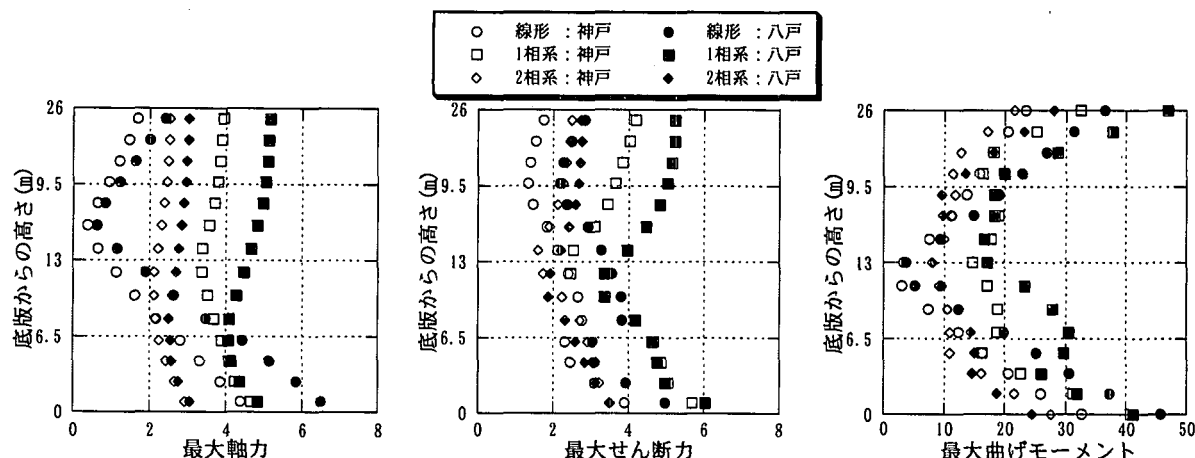


図-6 側壁に作用する荷重分布