

下水道施設の半地下構造物における 非線形応答震度法の適用に関する一考察

湯浅明¹・大角恒雄²・山本賢一³

¹正会員 株式会社解析技術サービス 耐震解析部

(〒104-0051 東京都中央区佃3丁目2番10号オーケンビル4F)

²正会員 博士(工学) 日本工営株式会社 中央研究所 開発研究部 耐震解析グループ

(〒300-1259 茨城県稲敷郡基崎町稻荷原 2304)

³日本下水道事業団技術開発部技術開発課(〒335-0037 埼玉県戸田市下笹目 5141)

兵庫県南部地震以後、大地震時(レベル2)における土木構造物の設計基準において、応答変位法や応答震度法など簡易計算手法の適用が検討されてきた。下水道施設には、水槽と建屋が一体化した2重覆蓋構造物など地中からある程度突出した半地下構造物が多く存在する。半地下構造物の地震時振動特性は、地上構造物と地中構造物の特性を持っているため、簡易設計手法の適用には十分な検討が必要である。ここでは、応答震度法と非線形動的解析結果を比較することで設計に対する応答震度法の適用について検討を行った。その結果、応答震度法において地盤、構造物とも非線形を考慮すること、地上構造物には、構造物固有周期の応答スペクトル値を荷重(震度)とすることで、非線形動的解析を応答震度法で実用的に再現できることが分かった。

Key Words : aseismic design method, earthquake ground motions, underground structure, nonlinear ground response acceleration method, nonlinear dynamic analysis

1. はじめに

兵庫県南部地震より4年経過し、各構造物の大地震時(レベル2)における設計基準が示されてきた。これら設計には、各構造物の断面力発生特性をふまえ、応答震度法¹⁾や応答変位法などの簡易計算法が採用されている。

下水道施設では、水槽と建屋が一体化した2重覆蓋構造物など地中からある程度突出した、いわゆる半地下構造物が多く存在する。半地下構造物の地震時振動特性は、地上構造物と地中構造物の特性を持っているため、簡易設計手法の適用には十分な検討が必要である。

半地下構造物への応答変位法の適用は、大ひずみレベルにおける地盤バネの精度の問題、地上に突出した構造物への適用が課題となる。

そこで本論文では、地盤、構造物の非線形性を考慮した応答震度法(以下非線形応答震度法とする)と非線形動的解析結果(断面力、応答塑性率など)を比較することで設計に対する応答震度法の適用について検討を行い、応答震度法の合理的な解析手法の提案を行うものである。

2. 解析モデル

非線形応答震度法は、地盤の剛性及び荷重震度を決めるのに、SHAKE²⁾(1次元波動論、等価線形化法)による方法(手法①)とR-Oモデルによる1次元非線形解析(手法②)の2通りを考えた。

解析モデルの概略を図-1に示す。

地盤は、非線形動的解析、非線形応答震度法の両者とも地表面から構造物底版位置までを軟弱なシルト層とし、その下を健全な砂質土層と設定した。

構造物は、下水道施設の中で半地下構造物である2重覆蓋構造物とした。非線形動的解析で使用した地盤の物性値を表-1に示す。本比較検討で用いた非線形動的解析と非線形応答震度法のモデル化の条件を表-2に示す。

構造物モデルは、非線形動的解析、非線形応答震度法ともにバイリニアモデルを使用した。地盤モデルは、非線形動的解析ではR-Oモデル³⁾、応答震度法手法①ではSHAKEによる収束値、手法②では1次元R-Oモデル解析による最小割線剛性を使用した。

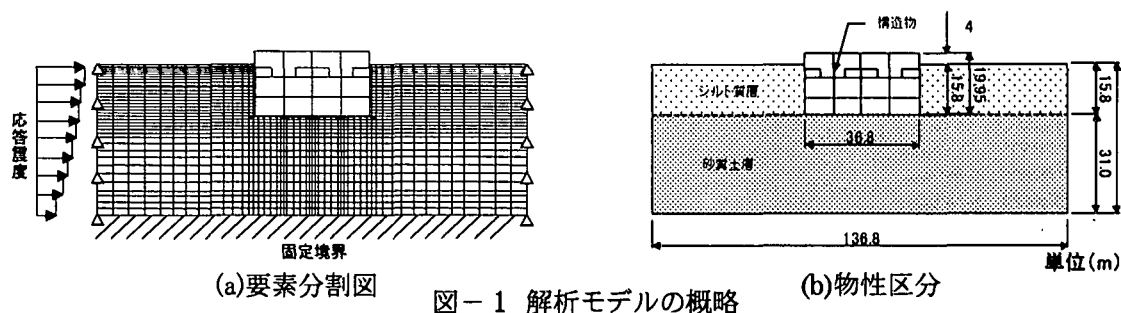


表-1 非線形動的解析で使した地盤の物性値

	湿潤密度 $\rho_s(\text{tf/m}^3)$	せん断波速度 $V_s(\text{m/s})$	初期せん断弾性係数 $G_0(\text{tf/m}^2)$	ポアソン比 ν	初期減衰定数 h_0
シルト層	1.8	125	2870	0.49	0.05
砂質土層	2.0	300	18400	0.47	0.05

表-2 解析手法のモデル化

	地盤		構造物	
	非線形化モデル	荷重	非線形化モデル	荷重
非線形動的解析	R-Oモデル	時刻歴応答	バイリニアモデル	時刻歴応答
非線形応答震度法解析 (手法①)	等価線形化解析(SHAKE)による収束値	一次元波動論による応答加速度	バイリニアモデル	応答スペクトルによる固有値の震度
非線形応答震度法解析 (手法②)	一次元R-Oモデルによる割線剛性	一次元R-Oモデルによる応答加速度	バイリニアモデル	応答スペクトルによる固有値の震度

3. 荷重条件

動的非線形解析では、レベル2地震動として、地震動簡易策定システム⁴⁾から南関東地震を想定し、入力地震動とした(図-2)。

非線形応答震度法解析では、地盤に対しては、上記入力地震動によるSHAKE(手法①)または1次元R-Oモデル解析(手法②)から、構造物底部と地表面の相対変位が最大となる時刻の地盤の応答加速度を求め震度として作用させた。

構造物に対しては、対象構造物が地上に突出している半地下構造物であるため、両1次元解析結果から、構造物底版位置での加速度応答スペクトル(図-3)を算定し、構造物の固有周期(1.32Hz)の応答加速度を構造物頂部の震度とし、構造物底版には地盤の震度として、両者の間は直線補間した。

構造物上部の応答は、非線形動的解析の480galに対し、非線形応答震度法手法①で733gal、手法②で543galであった。

4. 解析結果の比較

最初に、地盤の震度となる1次元モデルによる最大応答値分布を図-4に示す。非線形動的解析の自由地盤の応答が300galであるのに対し、非線形応答震度法手法①では、400gal、手法②では非線形動的解析とほぼ一致した結果となった。

構造物頂底版の最大相対変位は、非線形応答震度法手法②と非線形動的解析が8cmと近い値であったが、手法①では16cmと2倍の変形が生じた。

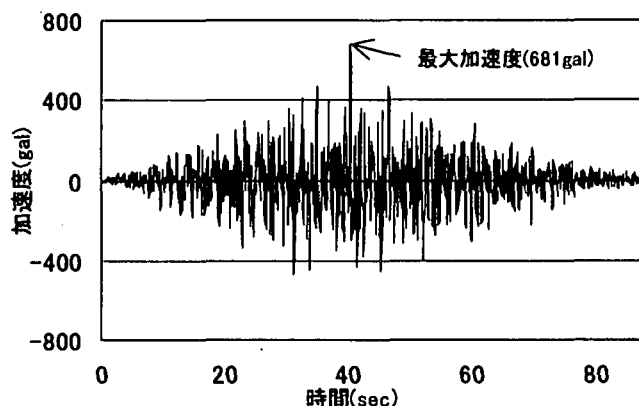


図-2 入力地震動

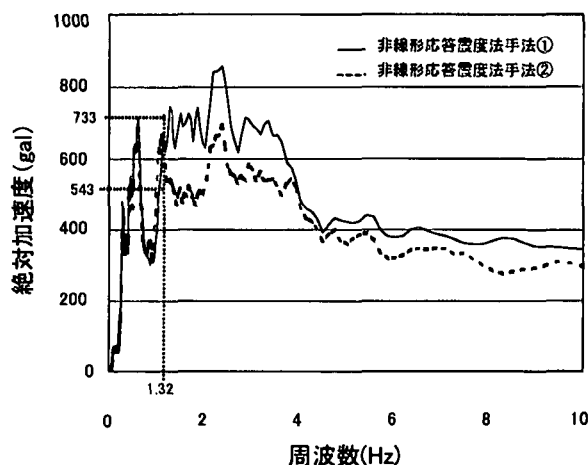
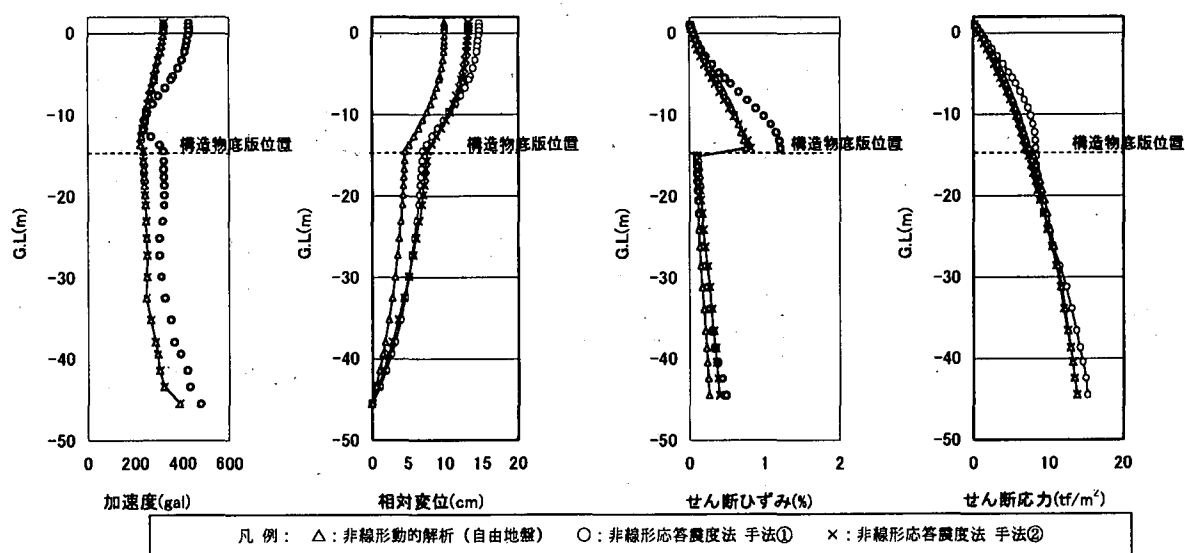


図-3 加速度応答スペクトル(減衰定数5%)



図－4 地盤の1次元解析結果の比較（最大値）

図－5、6に断面力比較図を示す。非線形動的解析と非線形応答震度法手法①では、非線形応答震度法手法①は多くの部材で非線形動的解析を上回っている（図－5）。非線形動的解析と手法②では、ほぼ等価な断面力が得られた（図－6）。

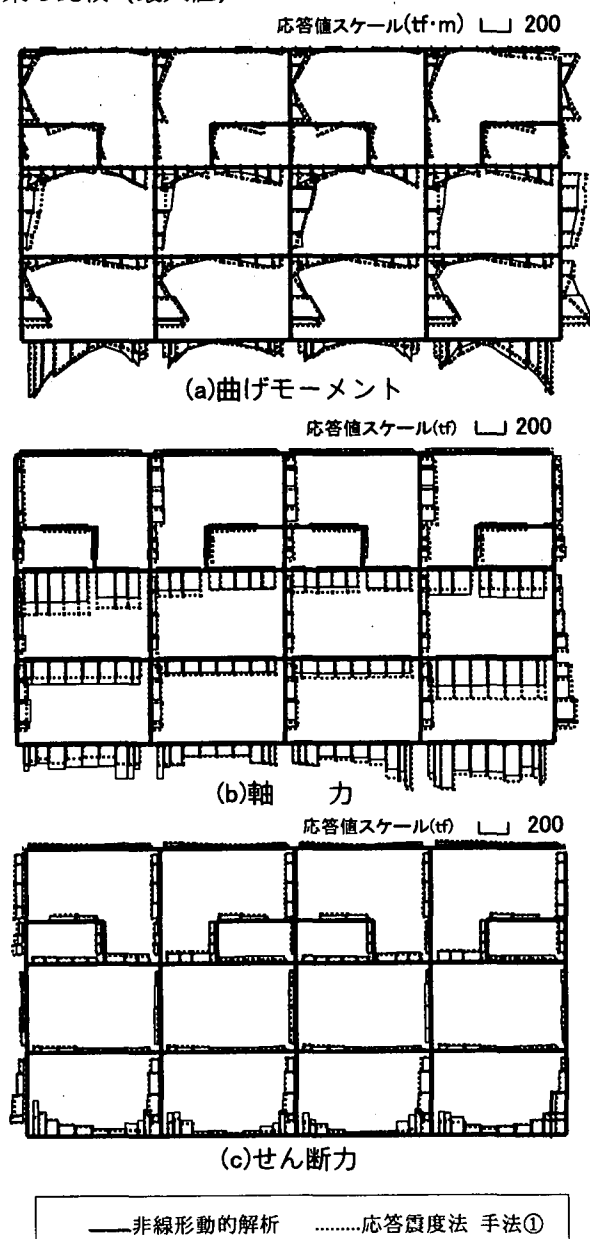
応答塑性率は、塑性率自体を一致させることは困難なため、「横浜市下水道設計・施工指針（案）」が構造物の補修を考慮し応答塑性率2を損傷の目安としていることから、応答塑性率2以上を評価した。

非線形動的解析では応答塑性率2以上は16箇所であった。非線形応答震度法手法①では36箇所と、ほとんどの部材が損傷を受け、動的非線形解析とかけ離れた結果となった。手法②では17箇所、損傷傾向も非線形動的解析とほぼ同じであった（図－7）。

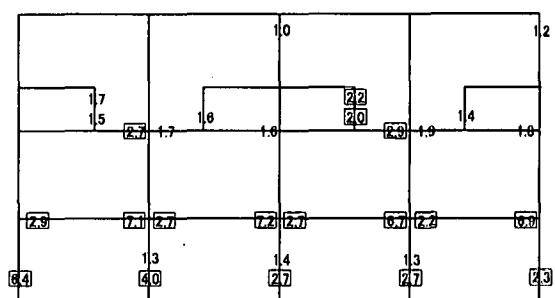
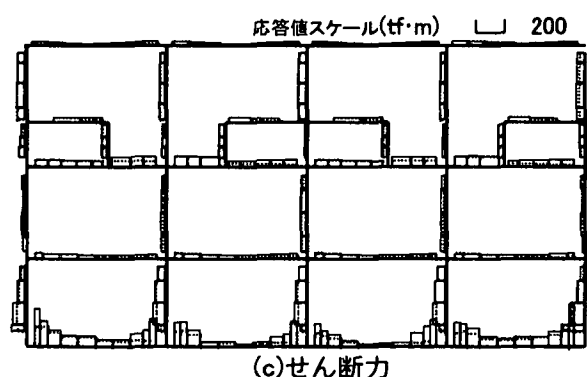
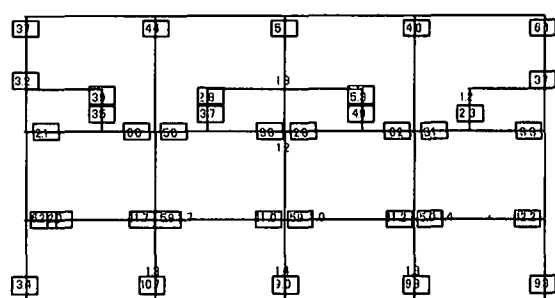
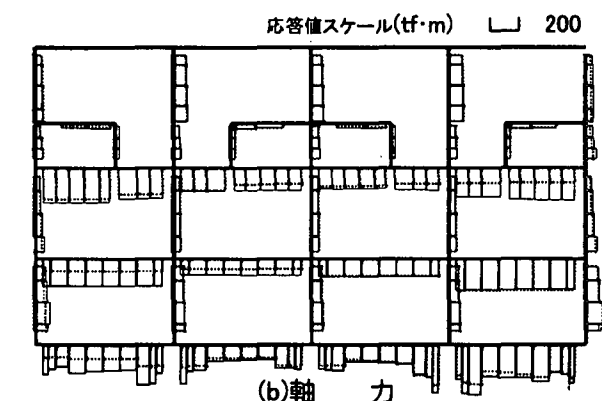
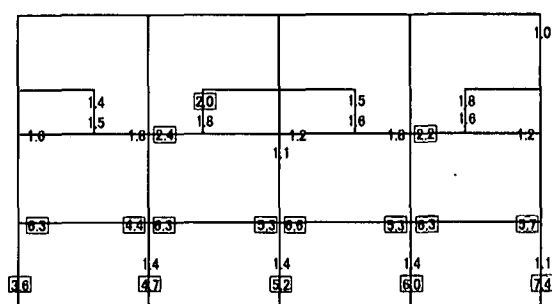
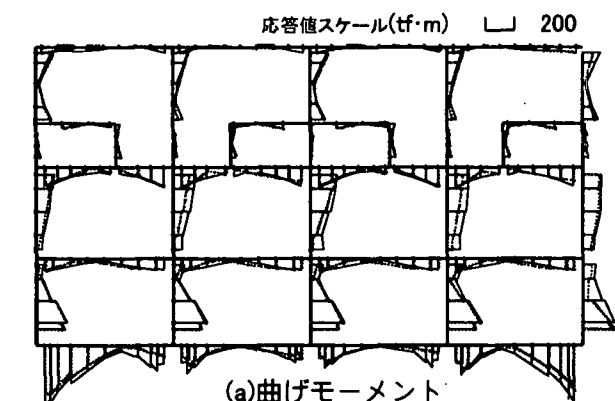
5. まとめ

動的非線形解析を模擬する手法として、半地下構造物の応答震度法の適用を検討してきた。結果をまとめる以下の通りである。

1. 応答震度法の課題とされる地盤から突出した構造物の震度は、構造物底版位置で加速度応答時刻歴の構造物固有周期の応答スペクトル値を用いることで、2次元非線形動的解析の応答値に近い値となった。
2. 地盤・構造物とも1次元解析による荷重（震度）の算定は、1次元等価線形解析 SHAKE よりも1次元非線形解析 R-O モデルの方が2次元非線形動的解析の応答値に近い値となった。
3. 構造物上下間の相対変位、断面力、応答塑性率とも1次元等価線形解析 SHAKE よりも1次元非線形解析 R-O モデルの方が2次元非線形動的解析の応答値に近い値となった。



図－5 断面力の比較（非線形動的解析と非線形応答震度法 手法①）



— 非線形動的解析 応答震度法 手法②

□は応答塑性率2以上の箇所

図-6 断面力の比較（非線形動的解析と非線形応答震度法 手法②）

図-7 応答塑性率

4. 応答震度法を適用することで、計算に要する計算時間は、動的な非線形解析に比べ 1/40 に減少する。

以上より、非線形動的解析を非線形応答震度法で実用的に再現できると考えられる。

なお、本システムは、「下水道施設における地震リスクマネジメントに関する研究」の一環として開発したもので、今後は、地震災害に対し、下水道施設にリスクマネジメントの概念を導入し、社会基盤システムの災害時の機能分析に基づいた災害軽減対策を検討する予定である。

参考文献

- 1) 片山幾夫・足立正信・嶋田穠・都築富雄：地中埋設構造物耐震設計のための実用的な解析手法について，第 19 回土質工学研究発表会，pp.1445-1448, 1984.
- 2) Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B. (1972): SHAKE A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley.
- 3) 岩崎敏夫、龍岡文夫、高木義和：地盤の動的変形特性に関する実験的研究(Ⅱ) 土木研究所報告 第 153 号 1980.3
- 4) 大角恒雄、山本賢一：断層モデルを考慮した地震動簡易策定システムの開発、第 33 回地盤工学研究会、pp.1131-1132, 1998.