

I - 135

地震観測波形を用いた鉛直地下構造物の地震時応力の算定

鹿島技術研究所 正会員 上野健治 正会員 大保直人

1. はじめに

著者らは、大深度鉛直地下構造物の地震時挙動の把握を目的として、1990年末より深さ約100mまで連壁で構築されたシールドトンネル発進立坑及び周辺地盤の地震時挙動観測を実施している¹⁾。併せて、周辺地盤を軟弱層と硬質層から成る2層地盤として大深度鉛直地下構造物の動的FEM解析を行い、その定性的な振動特性を把握した。さらに、この地盤条件の元では、地震荷重として地震時土圧と地震時周面せん断力を考慮した応答変位法により算定した構造物の地震時応力が動的解析とほぼ同等の値となることを確認した²⁾。

今回は、地震観測地点での地盤条件及び観測波形を用いて軸対称動的FEMにより自然地盤のシミュレーションを行い、地盤のモデル化、境界条件等、軸対称動的FEM解析の妥当性について検討した。次に、この地盤中に鉛直地下構造物が構築されることを想定して軸対称動的FEM及び応答変位法により構造物の地震時応力を算定し、応答変位法の適用性について検討した。

2. 軸対称動的FEMによる自然地盤の地震観測のシミュレーション

実測された観測地点の地盤物性を図-1に示す。この地盤条件を用いて、軸対称動的FEMにより地震観測のシミュレーションを行った。今回の解析では、鉛直下方から入射する水平面内のせん断波(SH波)を検討対象とした。そこで、比較的SH波が卓越する、震央距離が近く震源深さが深い地震の地表面での加速度波形を原波形として、一次元重複反射理論(SHAKE)を用いて、深さ125mの加速度波形を作成し、入力地震波とした。また、地盤のモデル化に際し、側方90m、深さ125mを解析領域とし、それぞれの境界条件としてエネルギー伝達境界及び粘性境界を用い、地盤の半無限性を考慮した。

自然地盤の地表面及び深さ50m、100mでの観測波形と解析結果の比較を図-2に示す。地表面だけでなく深さ50mと100mにおける動的FEMと地震観測による波形はよく近似しており、地盤のモデル化、境界条件等、軸対称動的FEMによる自然地盤の解析は妥当であると考えられる。

3. 軸対称動的FEM及び応答変位法による仮想構造物の地震時応力の算定

次に、図-1に示した地盤中に直径20m、深さ100mの円筒形鉛直地下構造物が構築されることを想定し、軸対称動的FEM及び応答変位法により構造物の地震時応力を算定し、実地盤における地震時応力の特性及び応答変位法の適用性について検討した。解析モデル及び解析ケース一覧を図-3、表-1に示す。現行の地下構造物の耐震設計では、周辺地盤を2層程度に単純化することが多く、この場合は構造物の一次振動モードが卓越する傾向にある。しかし、実地盤においても同様の傾向が見られるのか確認する必要がある。そこで、軸対称動的FEM及び応答変位法による解析では、深さ125mに対する地表面の相対変位が最大となる時刻、すなわち構造物が一次振動モードで変形したときに生じる応力値(動1st, 応1st)と高次振動モードの影響を含んだ構造物各要素の応力最大値(動max, 応max)を算定し、比較した。

応答変位法による解析では、構造物をシェル要素を用いて3次元的にモデル化し、境界条件として周囲に地盤ばねを取り付けた。このとき、構造物壁面の法線方向の地盤ばね定数は、半無限弾性体中の円孔に内圧を作用させた場合の理論式である下式により算定し、接線方向の地盤ばね定数は道路橋示方書等を参考にして法線方向の1/3の値とした。また、地震荷重として、地盤の相対変位に地盤ばね定数を乗じて算定する地盤時土圧及び地盤のせん断ひずみに地盤のせん断剛性を乗じて算定する地盤時周面せん断力を考慮した。荷重の算定に用いた地盤の相対変位は、自然地盤の軸対称動的FEM解析により算定した。なお、地震荷重の作用方法は、文献²⁾を参照されたい。

$$k = 2 \cdot G / R \quad (\text{ここに、} k ; \text{法線方向地盤ばね定数、} G ; \text{地盤のせん断剛性、} R ; \text{構造物半径})$$

4. 軸対称動的FEMと応答変位法による地震時応力の比較

構造物の地震時応力のうち、鉛直方向軸応力、面内せん断応力の深さ方向分布を図-4に示す。動的FEMによる最大値分布(動max)と一次振動モードの応力値分布(動1st)を比較すると、動maxの方が4割程大

表-1 解析ケース一覧

記号	解析名称	解析手法	応力値の分類
——	動max	軸対称動的FEM	最大値分布
----	動1st	軸対称動的FEM	地表面での変位が最大となる時の応力分布
——	応max	応答変位法	地盤変位の最大値分布から荷重を算定
----	応1st	応答変位法	地表面での変位が最大となる時の変位分布から荷重を算定

単位重量 (gf/cm ³)	せん断波 速度(m/s)
GL-0m	2.0 170
5.0m	1.8 189
22.5m	1.8 295
30.0m	1.8 320
35.0m	1.8 370
50.0m	1.8 437
65.0m	1.8 454
80.0m	1.9 510
100.0m	1.9 650
125.0m	

図-1 地震観測地点の地盤物性

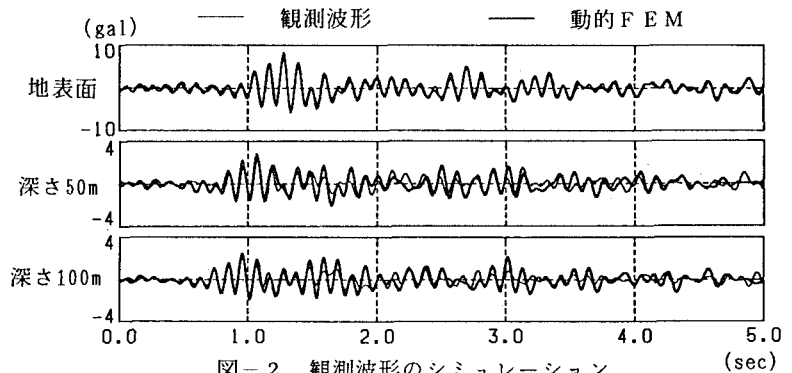


図-2 観測波形のシミュレーション

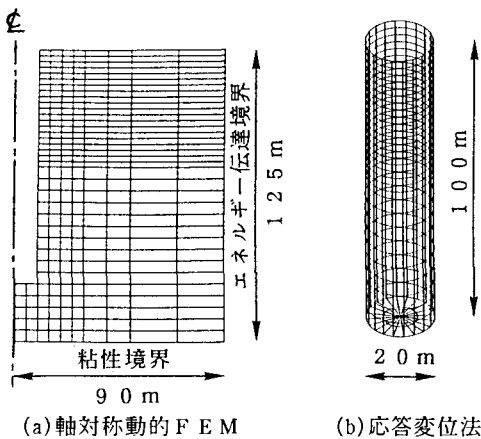


図-3 解析モデル

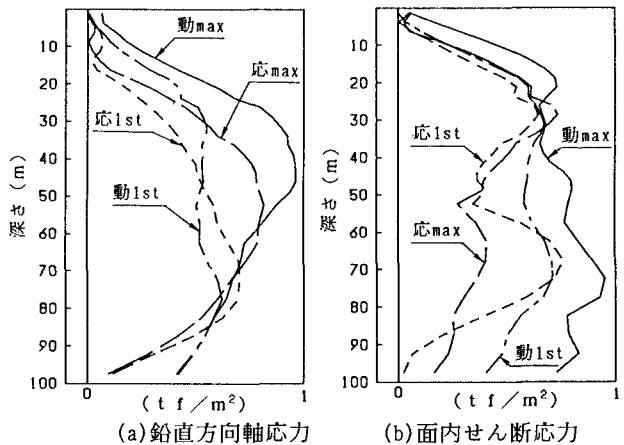


図-4 構造物の地震時応力

きく、高次振動モードの重ね合わせにより一次振動モードよりも大きな応力値が発生することを示している。また、動的FEM(動max、動1st)と応答変位法(応max、応1st)を比較すると、動1stと応1stはほぼ同等の大きさ、分布を示しているが、動maxと応maxでは動maxの方が2割程大きくなっており、応答変位法では、高次振動モードの影響が評価できていないことが分かる。このように、実地盤では高次振動モードの影響が大きく、応答変位法ではその影響を十分に評価できないことを考慮して耐震設計を行う必要がある。

5. まとめ

地震観測地点における地盤条件及び観測波形を用いて構造物の地震時応力を算定した結果、今回のような実地盤では高次振動モードの影響が大きく、応答変位法ではその影響を十分に評価できないことが分かった。また今回は、自然地盤について軸対称動的FEM解析の妥当性を検証したが、今後、構造物を含んだ全体系について同解析手法の妥当性及び応答変位法の適用範囲について検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 加藤, 大保, 林, 上野: 地盤と立坑の地震時挙動観測, 土木学会第46回年次学術講演会, 1991
- 2) 上野, 大保, 林: 応答変位法による大深度鉛直地下構造物の耐震解析, 土木学会第47回年次学術講演会, 1992