

(118) 円筒型地中構造物の動的相互作用と応答変位法の適用性

大成建設(株) 立石 章 植田 隆司
同 上 津田勝利

1. はじめに

円筒型地中構造物としては、シールド発進用の立坑や地下タンク等があり、これらの耐震計算法としては応答変位法が広く用いられている。円筒型地中構造物の応答変位法については近年研究が盛んであり、立坑に対しては、上野ら¹⁾が周面せん断力の影響評価を行ってその必要性を示し、河西ら²⁾が地盤ばねの算定法の評価を行って地盤ばねの重要性を示している。地下タンクに対しては、著者ら³⁾が周面せん断力および地盤ばねの評価を行ってきた。著者らの検討によれば、大型地下タンクを対象とした場合、周面せん断力は応答変位法の地震荷重としては理論的には必要な荷重であるが、ウインクラー型の地盤ばねと組み合わせると特に鉛直方向軸力が動的FEMと大きく異なる結果となり、設計的に危険側となる可能性のあることを示した。

本報告では、著者らが大型地下タンクを対象に実施した動的FEMと応答変位法の比較検討を立坑のような径の小さな円筒型地中構造物まで広げて、円筒型地中構造物における応答変位法の地震荷重について検討したので報告する。

2. 動的FEMと応答変位法の数値解析による比較検討

(1) 解析条件

対象構造物としては、図1に示したように、現在検討されている中で最大規模である20万klの大型地下タンク($r=37.5\text{m}$)を基本ケースとし、側壁高さを変えずに径を小さくした $r=23.0\text{m}$ のケースと $r=9.2\text{m}$ のケースの計3ケースとした。地盤条件は地下タンクが過去に建設された代表的な地盤のうち基盤が深いタイプとし、土質定数は過去の事例の平均的な値を用いた。対象構造物の側壁厚および底板厚は常時の土水圧により設計的な検討から設定した。地中連続壁はモデル化しなかった。入力地震動は、TAFT波EW成分を最大加速度 150Gal に規準化して、基盤表面(GL-50mの軟岩表面)にせん断波として鉛直入射した。

(2) 解析方法

解析は、まず等価線形化法を用いた重複反射解析を行い、応答変位法に用いる自然地盤の応答値を求めるとともに地盤の地震時等価剛性、等価減衰を求めた。

動的解析は、円筒型地中構造物-地盤を軸対称FEMモデルにモデル化して行った。地盤はソリッド要素

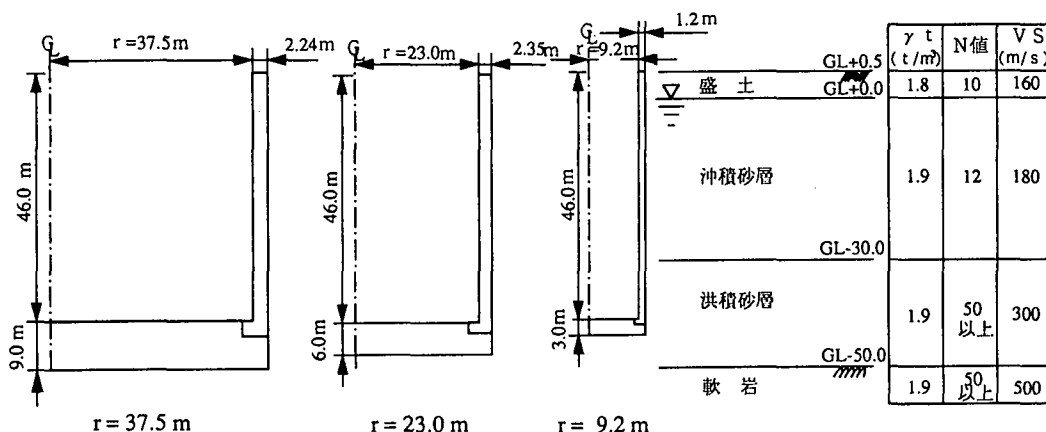


図1 検討対象構造物および地盤モデル

で表して等価剛性、等価減衰を用い、構造物は側壁をシェル要素で、底版をソリッド要素で表し、境界は側方をエネルギー伝達境界、下方を粘性境界とした。

応答変位法は、動的解析と同様に軸対称FEMモデルを用い、地震荷重としては、重複反射解析で得られた最大せん断ひずみを積分して求めた相対変位、最大せん断応力による周面せん断力、最大せん断応力を再現する等価震度による慣性力、を作用させた。地盤ばねとしては、動的FEMと同様に構造物と地盤との接触面がすべて連成している効果を考慮するため、地盤FEMで代用させることとし、図2に示したように2ステップで解析した。まず、地中構造物との接触面の自由度を水平、鉛直ともすべて固定した地盤のみのFEMモデルに相対変位を静的に作用させて、固定点自由度に生ずる反力を求める。これが、相対変位による地震荷重であり、構造物と地盤との接触面の全自由度が連成しているために、地盤モデル側面に水平方向の相対変位を作用させても、側面に水平荷重だけでなく鉛直荷重も発生し、さらに底面にも水平および鉛直荷重が発生することとなる。次に、この相対変位による地震荷重と、周面せん断力、慣性力を構造物-地盤FEMモデルに静的に作用させて地震時増分断面力を求めた。

(3) 解析結果

解析結果として、動的FEMと応答変位法による構造物側壁の地震時増分断面力の比較を図3に示す。動的FEMの結果は、ほぼ最大断面力の出現した側壁上下端最大相対変位発生時刻の同時刻分布を示した。応答変位法の結果は、全地震荷重を作用させたときの断面力と、相対変位による側壁への水平荷重のみを作用させたときの断面力を示した。相対変位による側壁への水平荷重は、通常のウインクラ型地盤ばねを用いた場合の相対変位による地震荷重に相当する。同図より、以下のことがわかる。

- ① 応答変位法の全地震荷重による断面力について見ると、面内せん断力、鉛直方向軸力および円周方向軸力は径の大きさによらず概ね動的FEMの結果と一致しているが、鉛直方向曲げモーメントおよび円周方向曲げモーメントは径が大きいケースでは動的FEMとの一致度が低く、径が小さくなるほど一致度がよくなり、 $r=9.2\text{m}$ のケースでは側壁下端を除いて動的FEMとほぼ一致している。
- ② 応答変位法の相対変位による側壁への水平荷重から求められた断面力を見ると、円周方向軸力は径の大きさによらず全地震荷重による結果と比較的よく一致しているが、その他の断面力は径が大きいケースでは全地震荷重による結果との一致度が低く、径が小さくなるほど一致度がよくなり、 $r=9.2\text{m}$ のケースでは全地震荷重および動的FEMによる結果とほぼ一致している。

以上より、径が小さくなるほど地盤FEM型の応答変位法と動的FEMの地震時増分断面力の一致度はよくなり、立坑のように径の小さな円筒型地中構造物は相対変位による側壁への水平荷重だけでも、動的FEMの結果を模擬できることがわかった。次項では、さらに応答変位法における地震荷重の地震時増分断面力への影響を詳細に調べる。

3. 応答変位法における地震荷重の地震時増分断面力への影響

地盤FEM型の応答変位法における各地震荷重を、相対変位による側壁への水平荷重、相対変位による側壁への鉛直荷重および底版への水平・鉛直荷重、周面せん断力、慣性力、の4つに分け、最大断面力への各

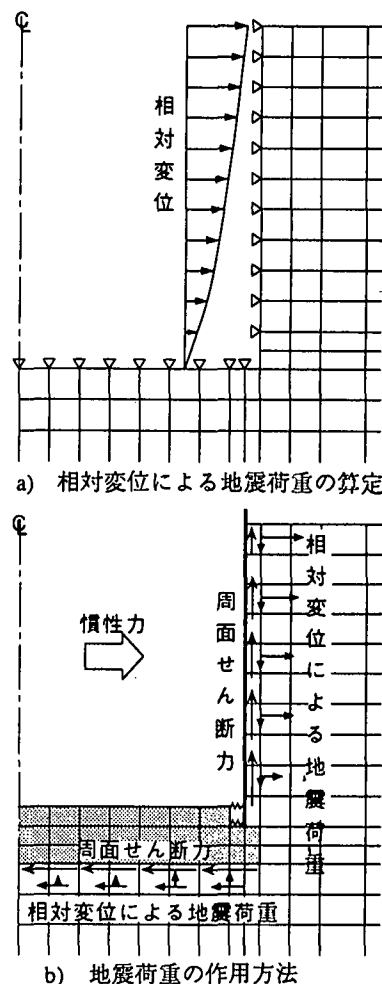


図2 地盤FEM型の応答変位法

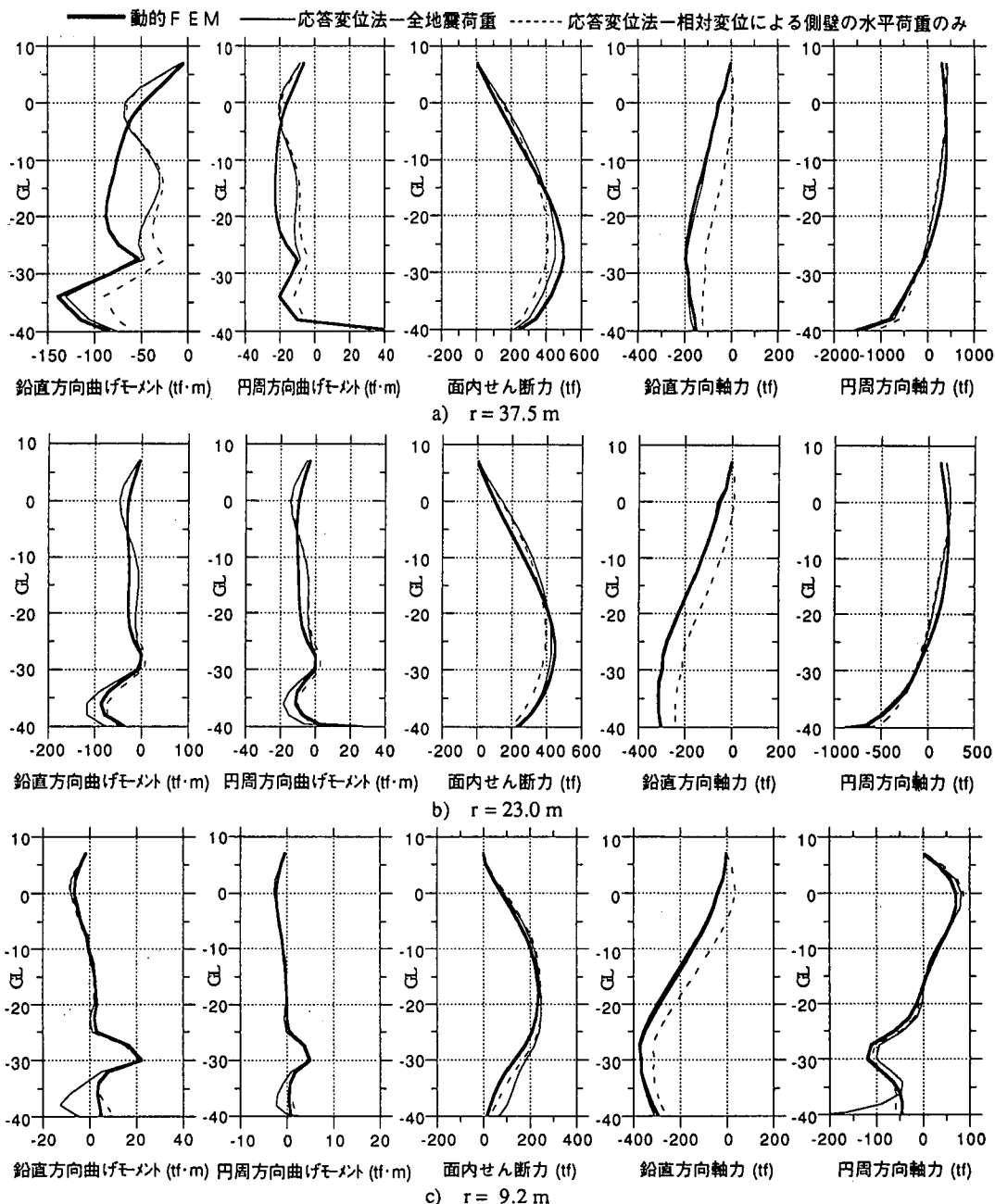


図3 動的FEMと地盤FEM型応答変位法の地震時増分断面力の比較

地震荷重の寄与率を動的FEMを100として図4に示す。同図より以下のことがわかる。

- ① 相対変位による側壁への水平荷重は、いずれの断面力に対しても径の大きさによらず寄与率が高く、 $r=37.5\text{m}$ のケースで50~70%、 $r=23.0\text{m}$ のケースで60~80%、 $r=9.2\text{m}$ のケースで80~110%で、径が小さくなるほど寄与率は高くなる。
- ② 相対変位による側壁への鉛直荷重および底版への水平・鉛直荷重は、鉛直方向軸力において寄与率が最も高いが、 $r=37.5\text{m}$ のケースで約80%、 $r=23.0\text{m}$ のケースで約60%、 $r=9.2\text{m}$ のケースで約20%で、径が小さく

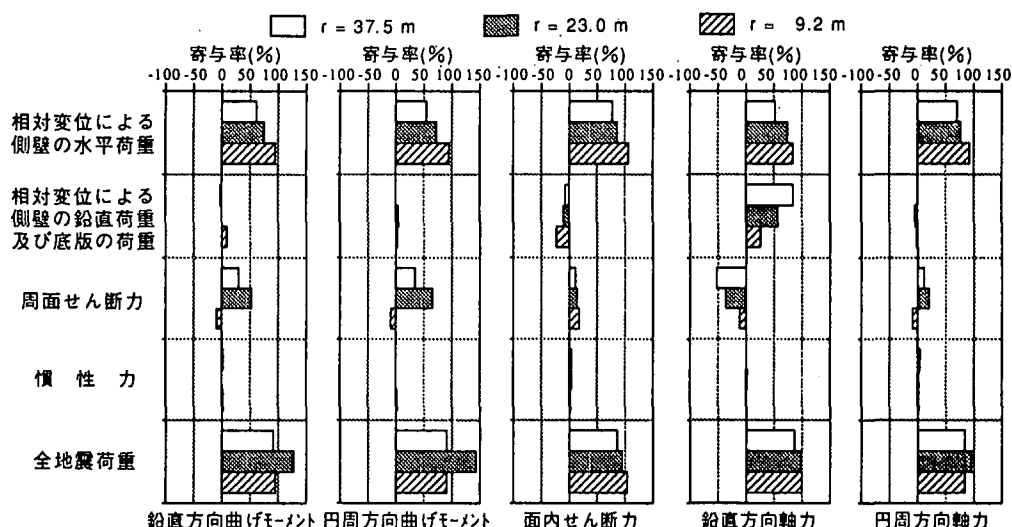


図4 地盤FEM型応答変位法の最大断面力に対する各地震荷重の寄与率（動的FEMを100）

なるほど寄与率は低くなる。その他の断面力に対しては寄与率は低い。

③ 周面せん断力は、径が大きいケースにおいてはいずれの断面力に対しても影響が無視しえず、20～50%の寄与率があるが、径の小さな $r=9.2\text{m}$ のケースでは10%以下と寄与率は低い。また、周面せん断力と相対変位による側壁への鉛直荷重および底板への水平・鉛直荷重は互いに打ち消しあう方向に作用する。

④ 慣性力は、径の大きさによらずいずれの断面力に対しても寄与率は5%以下と非常に低い。

以上より、地盤FEM型応答変位法の各地震荷重の最大断面力への寄与率は、立坑のように径が小さい場合は相対変位による側壁への水平荷重が100%近くとなるが、径が大きくなるほど相対変位による側壁への鉛直荷重や周面せん断力の寄与率が高くなることが明らかとなった。

この理由としては、構造物の高さに比して径が小さいために構造物の曲げ変形がせん断変形より卓越し、せん断変形に寄与する相対変位による側壁への鉛直荷重や周面せん断力の寄与率が低下することによるためと考えられる。ここで留意すべき点としては、通常のウインクラ型地盤ばねでは本報告で示した相対変位による側壁への鉛直荷重が考慮できず、特に径の大きな場合には周面せん断力と打ち消しあう鉛直方向軸力が過小評価される危険性があることである。

4. まとめ

円筒型地中構造物を対象に、大型地下タンク相当から立坑相当まで径を3通りに変化させ、地盤FEMを地盤ばねとして用いた応答変位法と動的FEMとで地震時増分断面力を比較し、各地震荷重の地震時増分断面力への影響を検討した。その結果、径が立坑のように小さい場合、応答変位法で通常用いられている相対変位による側壁への水平荷重により断面力は決定されるが、径が大きくなるにしたがい周面せん断力等の地震荷重の影響が無視しえず、地盤ばねの精度との関係でこれらの地震荷重を正しく評価する必要があることがわかった。

参考文献

- 1) (財) 土木研究センター；建設省総合技術開発プロジェクト地下空間の利用技術の開発報告書、平成4年8月。
- 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回年次学術講演会講演概要集第1部、pp. 1472～1473、平成4年9月。
- 3) 河西、高田、佐藤、嶋村；応答変位法による大口径立坑の耐震計算モデルに関する検討、土木学会第49回年次学術講演会講演概要集第1部、pp. 856～857、平成6年9月。
- 4) 三坂、立石、津田、池内；LNG地下タンクの応答変位法に用いる地盤ばねに関する一考察、土木学会第48回年次学術講演会講演概要集第1部、pp. 412～413、平成5年9月。
- 5) 立石、三坂、津田、池内；大型地下タンクの応答変位法における地震荷重、第22回地震工学研究発表会講演概要、pp. 639～642、平成5年7月。