

(167) 大型地下タンクの応答変位法における地震荷重

大成建設(株) 立石 章 三坂浩昭
同 上 津田勝利 池内義彦

1. はじめに

近年LNG地下タンクは大容量化しており、従来にも増して高い耐震性が要求されている。地下タンクの耐震計算法としては浜田¹⁾が地震観測結果より適用性を示した応答変位法があるが、応答変位法の地震荷重については、著者のひとりが提案しているように地盤の変位以外に周面せん断力が必要であることが明らかになってきている²⁾。これは、構造物を考えない自然地盤で地震荷重を求める場合には、自然地盤の地震時相対変位を地盤のばねを介して作用させると同時に、自然地盤の地震時応力に釣り合う力を構造物と地盤の全接触面に作用させるというもので、通常のせん断波の鉛直入射の場合にはせん断力を構造物周面に作用させることとなる。この周面せん断力は応答変位法の新たな地震荷重として大断面シールド、地下駐車場、大深度立坑など大型の地下構造物においてその必要性が示されてきており³⁾、注目を集めている。

本報告は、大型地下タンクを対象として、周面せん断力を中心に応答変位法の地震荷重について解析的に検討した結果を報告するものである。検討は、動的FEMの結果を規準解とし、周辺地盤のモデル化としては、通常設計に用いられているウインクラタイプの地盤ばねと、地盤との接触面の自由度がすべて連成している地盤インピーダンスの二通りを用いて応答変位法を実施し、比較検討した。

2. 応答変位法と動的FEMの数値解析による比較検討

(1) 解析条件

対象とする地下タンクは、現在検討されている中で最大規模である20万klのものを設定し、剛底版タイプとした。地盤モデルは、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。また、本検討では地中連続壁はモデル化しなかった。図1に地下タンクおよび地盤の検討モデルを示す。

入力地震動は、TAFTEW波を最大加速度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、自然地盤の応答値および地盤の地震時等価剛性、等価減衰を求めた。

動的解析は、地下タンク-地盤の軸対称モデルにより行った。地盤は等価剛性、等価減衰を用い、地下タンク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。

ウインクラタイプの地盤ばねは、ここでは著者らの検討⁴⁾に基づき、等価剛性を用いた地盤FEMモデルにフーリエ一次モードで一樣荷重を作用させてばね定数を求めた。図2に地盤ばねを用いる応答変位法の解析モデルを示す。

地盤インピーダンスは、本検討では地盤FEMに

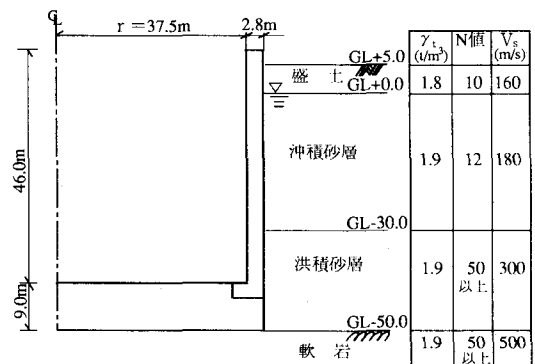


図1 地下タンクおよび地盤の検討モデル

より代用させ、図3に示したように、2ステップで解析した。まず、地下タンクとの接触面の自由度を水平、鉛直とも固定した地盤のみのFEMモデルに相対変位を作用させて、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となる。次に、この相対変位による地震荷重および周面せん断力、慣性力を地下タンク-地盤FEMモデルに作用させて断面力を求めた。

(3) 解析結果

解析結果として、応答変位法と動的FEMによる地下タンク側壁の断面力の比較を図4、図5に示す。動的FEMの結果はほぼ最大断面力の出現した同時刻分布を示した。また、応答変位法の結果は地盤ばね型、地盤FEM型とも周面せん断力のありとなしの2ケースを示した。同図より以下のことがわかる。

- ① 鉛直方向および円周方向曲げモーメントと円周方向軸力については、地盤ばね型、地盤FEM型とも、応答変位法の結果は側壁下部では動的FEMと比較的よく一致しているが、側壁上部では動的FEMと異なる分布形状となっている。応答変位法における周面せん断力の有無の違いは、地盤ばね型、地盤FEM型とも、周面せん断力ありの方が周面せん断力なしより側壁下部では若干大きい結果となっている。
- ② 面内せん断力については、応答変位法の結果は動的FEMと同様な分布形状となっており、地盤ばね型より地盤FEM型の方が動的FEMにより近い値が得られている。応答変位法における周面せん断力の有無の違いは、地盤ばね型、地盤FEM型とも、周面せん断力ありの方が周面せん断力なしより若干大きい結果となっている。
- ③ 鉛直方向軸力については、地盤FEM型の応答変位法のうち周面せん断力ありの結果が動的FEMとほぼ一致しているのに対し、地盤ばね型では周面せん断力ありの結果はほぼゼロとなっていて、地盤ばね型と地盤FEM型で大きく異なる結果となった。

以上より、鉛直方向軸力を除く断面力に対しては、地盤ばね型、地盤FEM型とも応答変位法の結果は周面せん断力の作用により若干だが動的FEMに近づく傾向が見られたが、鉛直方向軸力に対しては地盤ばね型と地盤FEM型で大きく異なる結果となった。そこで、次項において応答変位法の各地震荷重が断面力に及ぼす影響について詳細に調べる。

3. 応答変位法における地震荷重の断面力への影響

通常ウインクラータイプの地盤ばねを用いた場合、水平方向の相対変位を地盤ばねを介して作用させると、荷重としては地下タンク側壁に水平荷重が作用することとなる。一方、地盤インピーダンスを用いた場合は、地盤との接触面の自由度がすべて連成しているため、地盤インピーダンスを介して水平方向の相対変位を作用させても、側壁に水平荷重だけでなく鉛直荷重も作用し、さらに底版にも水平および鉛直荷重が作用することとなる。このことは、本検討の地盤FEMで代用した場合も同様で、図3a)で示したすべての固定点自由度に相対変位により水平および鉛直反力が生じるのとまったく等価である。

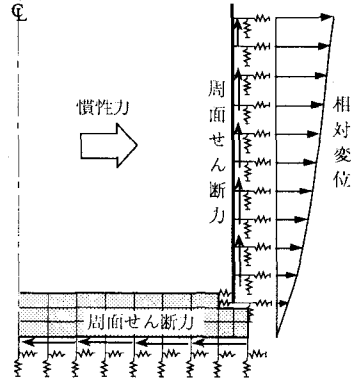
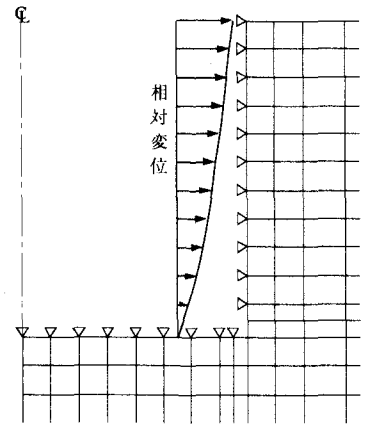
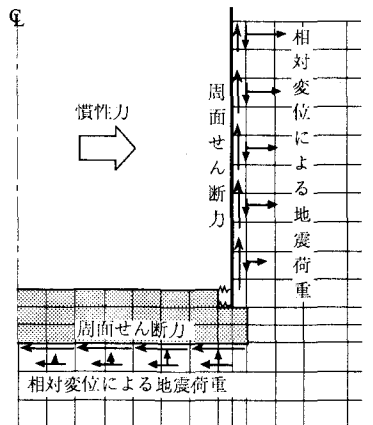


図2 地盤ばね型の応答変位法



a) 相対変位による地震荷重の算定



b) 地震荷重の作用方法

図3 地盤FEM型の応答変位法

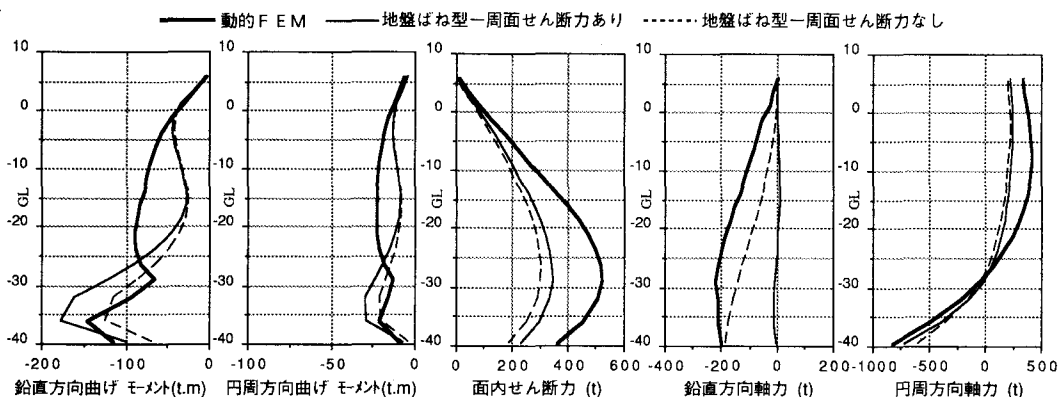


図4 地盤ばね型応答変位法と動的FEMの地震時増分断面力の比較

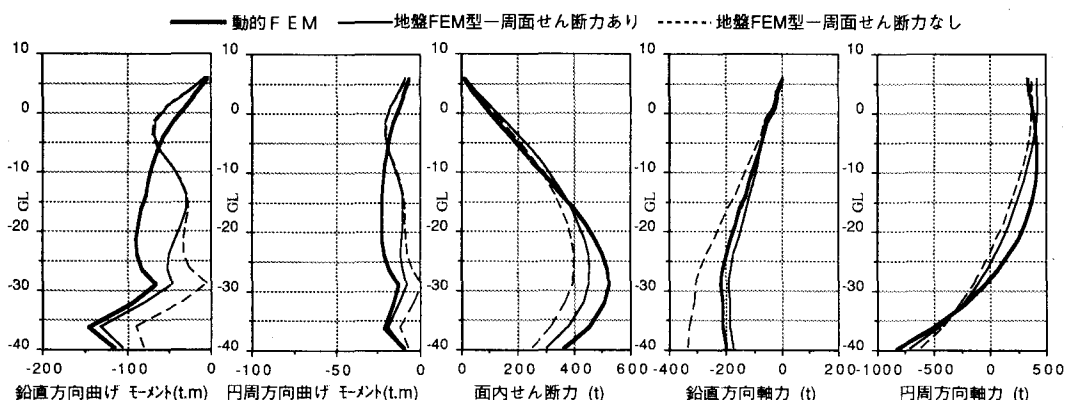


図5 地盤FEM型応答変位法と動的FEMの地震時増分断面力の比較

そこで、地盤ばねと地盤インピーダンス（地盤FEM）による地震荷重の違いを明らかにするために、表1に示したように相対変位による地震荷重を側壁への水平荷重とその他の荷重に分け、周面せん断力、慣性力も含めて、応答変位法における各地震荷重の最大断面力への寄与率を調べた。図6、図7に各地震荷重の寄与率を動的FEMの結果を100としたときの比率で示す。同図より以下のことがわかる。

① 鉛直方向軸力を除く断面力への寄与率が最も高いのは、地盤ばね型、地盤FEM型とも、相対変位による側壁への水平荷重であり、約50～80%の寄与率となっている。次に寄与率が高いのは地盤ばね型、地盤FEM型とも周面せん断力の約10～40%で、慣性力の寄与率は5%以下と小さい。地盤FEM型特有の相対変位によるその他の荷重も10%以下と小さい。

② 鉛直方向軸力については、地盤ばね型、地盤FEM型とも、相対変位による側壁への水平荷重の寄与率が約50%、周面せん断力の寄与率が約50%と相殺しあう結果となっている。地盤FEM型では、相対変位によるその他の荷重の寄与率が約80%あるが、これは主に側壁への鉛直荷重の影響であり、これにより地

表1 地下タンクの応答変位法の地震荷重

地盤ばね型	地盤インピーダンス型 (地盤FEM型)
自然地盤の相対変位による側壁への水平荷重	自然地盤の相対変位による側壁への水平荷重
	自然地盤の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
自然地盤のせん断応力による側壁、底版への周面せん断力	
自然地盤の等価震度による側壁、底版の慣性力	

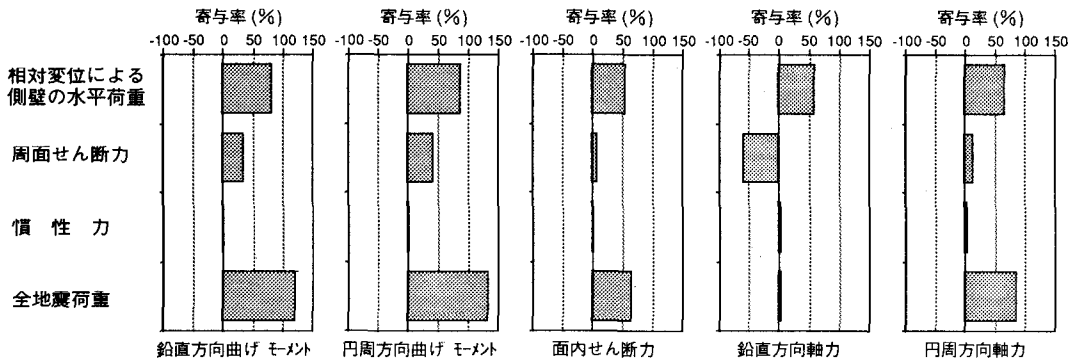


図6 地盤ばね型応答変位法の最大断面力に対する各地震荷重の寄与率（動的FEMを100）

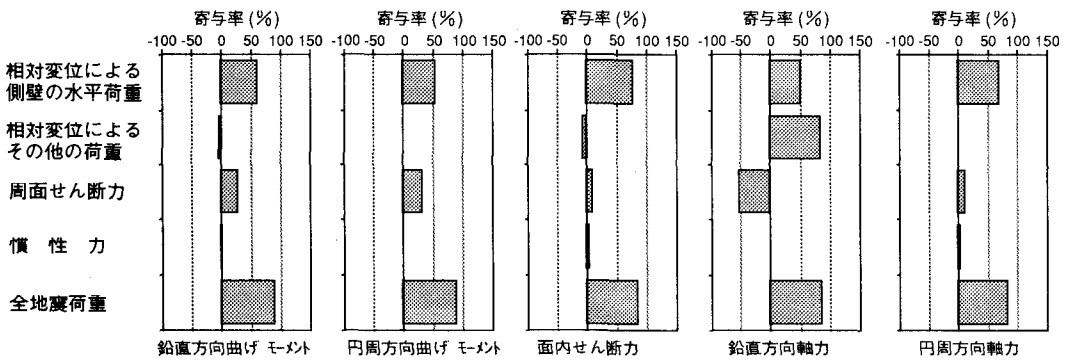


図7 地盤FEM型応答変位法の最大断面力に対する各地震荷重の寄与率（動的FEMを100）

盤FEM型では動的FEMに近い鉛直方向軸力が得られている。

以上より、限られた解析ケースではあるが、本検討の結果では、大型地下タンクを対象とした場合、一般に行われている自然地盤の地震時相対変位を作用させる応答変位法は、動的FEMより小さめの断面力を与えることがわかった。周面せん断力については、鉛直方向軸力を除く断面力に対しては増加させる方向に働くが、鉛直方向軸力に対しては逆に減少させる方向に働くため、ウインクラータタイプの地盤ばねのように水平方向の相対変位による鉛直荷重が評価できない場合は危険側の結果となる可能性があることがわかった。

4. まとめ

大型地下タンクを対象として、応答変位法における地震荷重の断面力への影響について動的FEMの結果と比較することにより検討した。その結果、最近応答変位法の新たな地震荷重として注目されている周面せん断力は、鉛直方向軸力を除く断面力に対しては概ね動的FEMの結果に近づける方向に働くものの、鉛直方向軸力に対しては非線形性等の取り扱いの容易さから通常設計に用いられているウインクラータタイプの地盤ばねと組合せると危険側の結果となる可能性があることがわかった。

今後は、地下タンクの構造形式や地盤モデル等をパラメータとして解析事例を蓄積するとともに、地盤ばねの精度の向上を図り、大型地下タンクの合理的な静的耐震計算法の研究を進めていきたい。

参考文献

- 1) 浜田政則：大型地下タンクの地震時挙動の観測と解析、土木学会論文集、第273号、1978年5月。
- 2) 立石章：応答変位法における地震荷重の作用方法に関する研究、土木学会論文集、第441号、1992年1月。
- 3) (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。
- 4) 三坂浩昭他：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、平成5年9月（発表予定）。