

1. まえがき

半径と深さが数十メートルにおよぶ円筒型地下タンクを建設し原油やLNGを貯蔵するプロジェクトが各地で進められている。この種のプロジェクトは沖積地盤を用地として数基以上のタンクを群状に建設する場合が多い。そのため、地下タンクが群となった場合の地震応答特性を検討し設計上の注意点を把握しておく必要がある。

前報で¹⁾ 著者は模型実験によって群地下タンクの地震応答特性を解析した結果を報告しているが、本報では3次元の有限要素法を用いた数値解析の結果を報告し、それ等の結果を用いて群地下タンクの耐震設計法を検討した結果について述べる。

2. 数値解析法

2.1. 解析モデル 図-1は前報で報告した実験模型の概要を示したもので、この模型を対象にして3次元有限要素法による解析モデルを作成した。図-2はタンク1基の場合、図-3は6基の場合のメッシュ分割を示したもので、いずれも対称条件と逆対称条件を利用した $1/4$ モデルである。地盤の部分には一般的な3次元ソリッド要素、タンクの部分には四辺形の板要素を用いている。

2.2. 震度法の適用 地中建造物の地震応答は地盤の応答に支配され慣性力の影響による動的相互作用は一般に無視できる、即ち応答変位法が適用できるとされている。地下タンクの場合においても、タンク躯体の歪は地盤歪に支配されタンクがその慣性力の影響によって独自に踊るような振動は生じないとされている。^{2),3)}したがって、地盤の歪が適切に求められていれば動的な計算は必ずしも必要ないと考えることができる。そこで本解析では震度法の考え方に従うこととし、解析モデル全体に一樣一定の水平加速度を作用させて静的に応答を計算することとした。この様な方法の適用性を確かめるため図-2のモデルについては動的解析も合わせて行ない、1次モードによる応答と震度法の結果とを比較した。タンクから充分離れた地盤表面の変位が等しくなるように基準化しタンク側壁の歪を比較したものが図-4で、よ

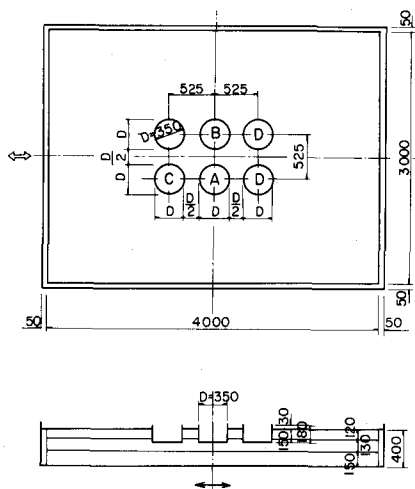


図-1 模型の概要

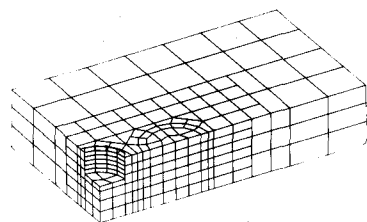


図-2 1基の解析モデル

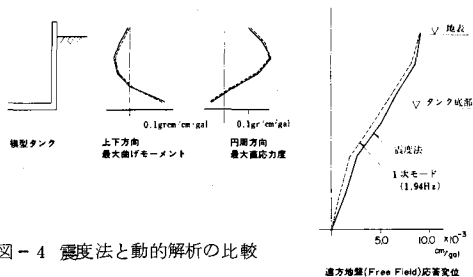


図-4 震度法と動的解析の比較

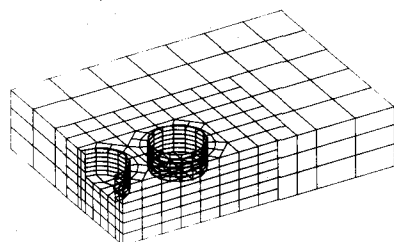


図-3 6基の解析モデル

一致がみられる。

3. 模型実験のシミュレーション

実験手順に従ってタンク1基, 2基, 4基, 6基の場合について計算を行ない, タンク側壁頂部の半径方向タワミを求めた。図-5に計算結果を, 図-6に実験結果を示している。実験結果は1次共振状態における実測値であるが, 実験の精度とメッシュの粗さを考慮すれば, 計算値は実験値の傾向をよく説明しているとみなすことができる。

同じ計算結果からタンク側壁代表点の円周方向歪を求め, 地震波入力の実験値と比較したものが図-7から図-10である。これ等の図の横軸はタンク基数と対象位置を示したもので, 縦軸は側壁の歪を遠方地盤の歪(地表面水平変位/地盤深さ)で除して基準化した値を示している。実験による歪はゴムの側壁に箔ゲージを張って測定したものであるため指示率(測定歪/実歪)が約50%で測点によるバラツキもあったこと, 実歪が小さな測点では実験誤差が相対的に大きくなっていること, 等を考慮すれば計算値は実験値とよく対応していると考えることができよう。実験の地震波は3種類で, 地盤の1次卓越振動数と地震波の主要振動数の関係ではRandom波が高く, Hachinohe波が低く, El Centro波がほぼ一致している。入力加速度が同一であると後者ほど応答は大きくなるが, 上述の様な基準化により地震波によるバ

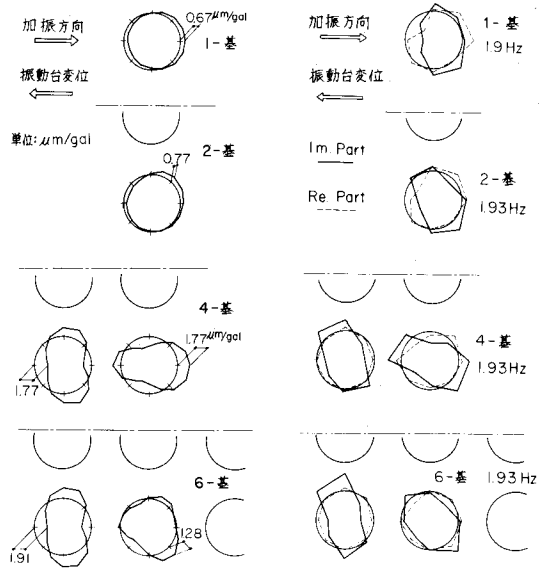


図-5 側壁タワミ解析値

図-6 側壁タワミ実験値

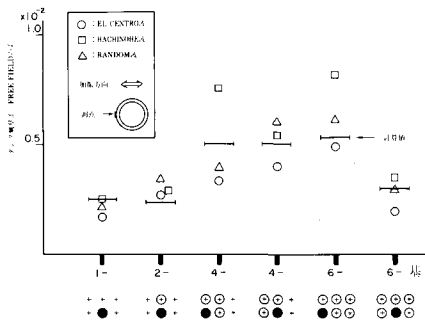


図-7 側壁歪の比較

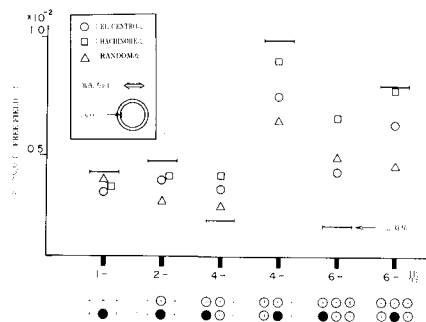


図-8 側壁歪の比較

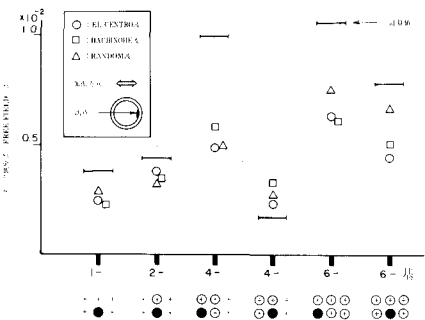


図-9 側壁歪の比較

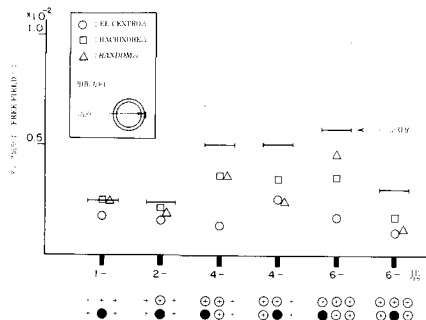


図-10 側壁歪の比較

ラッキは小さくなる。

以上の結果から、タンク側壁の応答については震度法による解析が群の場合にも適用可能と考えられる。

4. タンク間距離の影響

タンク4基を対象とし、タンク間距離を0.75Dと1.0Dにした場合の計算を行なった。図-11は図-5と同様に側壁の半径方向タワミを示したもので、タンク間距離が大きくなるとオーバリング変形成分が減少し、タワミ分布形状はタンク1基の場合に収束する傾向を示す。

図-12はタンク1基の場合を基準にとって代表点における側壁歪の増減とタンク間距離の関係を示したものである。面内方向のセン断歪以外の歪はタンク間距離が小さくなると共に増加しており、0.5Dの場合には3倍近い値となる。図-13は側壁歪を曲げ成分と軸成分に分離しその増減とタンク間距離の関係を示したものである。タンク間距離が小さくなると曲げ歪が増加しており、特に円周方向成分の増加が著しい。前報でも述べたように、群の影響によって側壁にオーバリング変形が発生し曲げ歪が増加したものと考えられる。

5. 現行耐震設計法との関係について

現在、地下タンクの耐震設計法について数種の指針あるいは基準が提案されている^{4),5),6)}。そのいずれもが群の影響を定量的に評価する方法について触れていないが、地震時に地盤からタンクに作用する荷重については地震時土圧法あるいは応答変位法によって評価するように定めている。したがって、これ等の計算法によって得られる結果が群の影響を包絡しているかどうかを検討する必要がある。

3.で述べた計算結果からタンク側壁に作用する土圧分布を求め、相似率を用いて実存のスケールに変換して示したものが図-14である。0.2Gの水平加速度入力に対し約 10 ton/m^2 の土圧が作用しているが、オーバリングに寄与する偏土圧は4基の場合と6基の場合の端部タンクにおいて顕著に現われる。これ等のタンクでは左右の側壁に作用する土圧の差が約 5 ton/m^2 両押し成分にして 2.5 ton/m^2 の偏土圧が作用していることになる。一方、地震時土圧法においては、通常、筒部物部式より求められた地震時土圧を偏土圧としてタンクの両側から押し潰すように作用させている。この場合の偏土圧は 10 ton/m^2 以上の値となることが多いので、群の影響については数倍の安全率があることになる。

図-14のタンク1基の場合は片押し片引きの逆対称荷重が作用していることを示している。応答変位法では地盤の変位を両押しして作用させる場合と片押し片引きで作用させる場合があるが、仮に片押し片引きをタンク1基の場合の荷重状態に相当すると考えることにすれば、両押しの場合あるいは地震時土圧法による場合は群タンクの荷重状態に対応と考えることができる。そこで、ある実在の地下タンクを対象としてこれ等の計算法により側壁最大応力度を計算し、応答変位法の片押し片引きを基準にとって計算法による応力の変化をプロットしたものが図-15である。図-12と図-15を比較すれば、タンク間距離が0.5D程度まで小さくなって側壁の応力が増加したとしても、地震時土圧法あるいは応答変位法の両押しによって側壁応力の検討を行なっておけば群の影響は安全

タンク壁頂部の半径方向変形分布

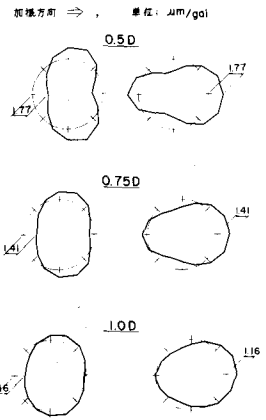


図-11 側壁タワミとタンク間距離

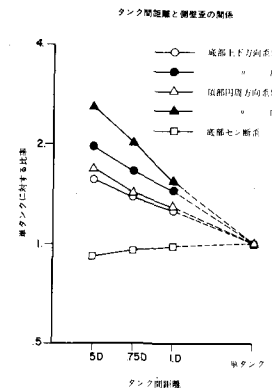


図-12 側壁歪とタンク間距離

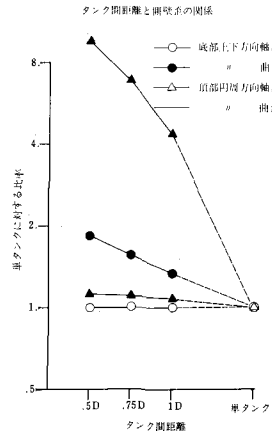


図-13 曲げ、軸歪とタンク間距離

側に考慮されていることになる。

図-12は4基の場合の代表点の歪について示したものである。そのため3.で述べた計算結果から側壁の深度ごとに円周方向歪の最大値を求め、分布図を作成して図-16に示した。タンク基数が増加すると側壁の歪は各深度にわたって増加するが最も増加する側壁頂部においても高々3倍であり、図-12と同じ結果となる。

6. まとめ

前報で述べた結果も含めて本研究の結論を要約すると次の通りとなる。

- (1) タンクが群設されても慣性力の影響によるタンク相互の干渉振動は生じない。
- (2) タンク間に挟まれた地盤が周辺地盤から独立した振動系を構成し比較的高い振動数域で共振現象を呈するがタンクの応答には大きな影響を与えない。
- (3) タンクが群設されると地盤からタンクに作用する荷重は不均一となり、タンク側壁にオーバリング変形が生じる。そのため、タンク側壁に生じる歪はタンク1基の場合より大きくなる。
- (4) タンク間距離が小さくなると歪の増加は著しくなるが、タンク間距離が0.5Dの場合においても現行の耐震計算法にしたがって応力解析を行えば群の影響は安全側に包絡される。
- (5) 地盤とタンクを連成させたモデルを用いれば、震度法によって地下タンク側壁の地震応答を推算することが可能である。
- (6) 本研究は鉛直下方から地震波が入力する場合の問題を扱ったものである。表面波が作用する場合の問題については別途の検討が必要となる。

〔参考文献〕

- 1) 後藤洋三, 白砂健; 沖積地盤における群地下タンクの地震応答特性について, 第15回地震工学研究発表会講演概要, 1979
- 2) 浜田政則; 大型地下タンクの地震時挙動の観測と解析, 土木学会論文報告集 №273, 1978
- 3) 後藤洋三, 白砂健; 回転体有限要素法による地下タンク模型振動実験の解析, 土木学会第34回年次学術講演会講演概要集I, 1979
- 4) 土木学会; 地下貯油施設技術指針(案), 1980
- 5) 日本瓦斯協会; LNG地下式貯槽指針, 1979
- 6) 電気事業連合会; LNG地下式貯槽(土木設備)設計指針, 1978

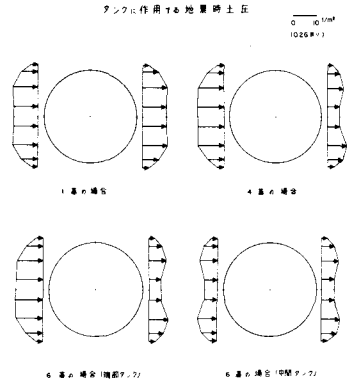


図-14 動土圧分布解析値

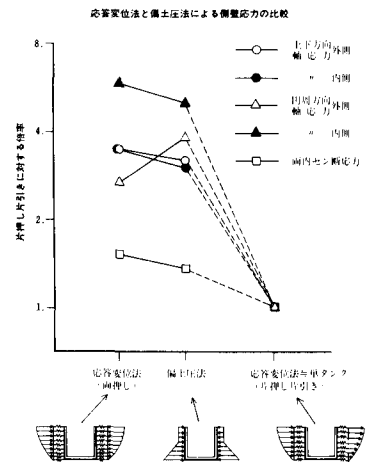


図-15 耐震計算法と側壁応力

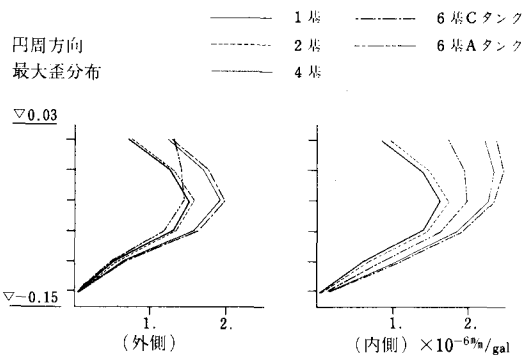


図-16 側壁歪分布解析値