

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

榑大林組 正員 ○後藤 洋三  
榑大林組 正員 白砂 健

1 はじめに

原油等の原燃料を貯蔵する円筒型地下タンクは隣海の沖積地盤中に数基以上が近接するタンク群として建設される場合が多い。そのため、タンク1基の耐震性と共にタンクの耐震性及び群の影響についても研究を進め、設計上の対策を明らかにしていく必要がある。そこで我々は、振動台を使った地盤一群タンク連成系の模型振動実験を行ない、さらに数値解析を補足的に行なって地震時における群地下タンクの応答特性について検討を進めてきた。

振動台を用いて縮尺の大きい地盤-構造物連成系の模型実験を行なう場合、実験を弾性域に限定しても材料の減衰性、地盤の境界条件、地震波の入力条件(方向、位相)等を相似させることは困難である。そのため、ここでは地震波は鉛直下方から入力するものとして、単一タンクと群タンクの応答特性差を見出すことを主目的とした実験を行なった。実験のモデルとしては半径と深さが数十メートルに及ぶRC地下タンクが0.5Dの間隔で6基まで建設される状態を想定した。

2 実験方法

図-1と図-2は模型の概要を示したものである。模型地盤はアクリルアミドゲルで製作し、上層から下層に向かって硬くなる3層構造とした。地盤の側方境界と実験槽側壁の間に5cm巾の糊層を全周にわたって設け、地盤の動きが拘束されないように配慮した。模型タンクの底板は実験手法上の都合から剛な塩ビ樹脂板により作成し、側壁は相似率を考慮してシリコンゴムで作成した。模型タンクの設置は、あらかじめ作成されている模型地盤に穴を掘ってタンクを挿入し、隙間に地盤材料を注入して固定する方法を取った。

模型の相似率は空間スケールが1/150、時間スケールが1/3、剛性のスケールが1/4250、密度のスケールが1/1.7であり、慣性力と弾性復元力に関する相似則は満足されている。

実験は、地盤のみ (Free Field)、タンク1基、2基、4基、そして6基を順次設置した状態で行ない、それぞれ正弦波(1~15Hz)とランダム波(EL CENTRO等)で加振した。計測対象は、タンクを剛体とみなした場合のスウェイとロッキング、タンク壁の円周方向歪(A1~A12)と円筒軸方向歪(C1~C3, D1~D3)、そしてフォトトランジスターを利用した側壁のタワミ(P1~P8、底板と側壁頂部の半径方向相対変位検出)である。また、地盤内加速度も多点測定した。側壁のゴムに接着した歪計の指示率はゴムの実歪の約50%であった。

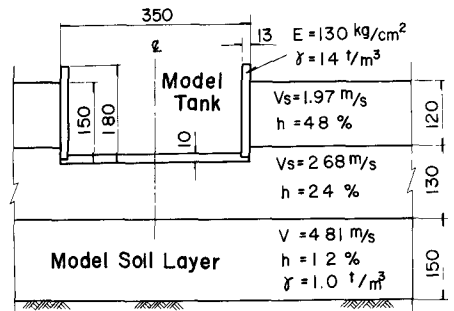


Fig.1 Cross Section of Model Tank

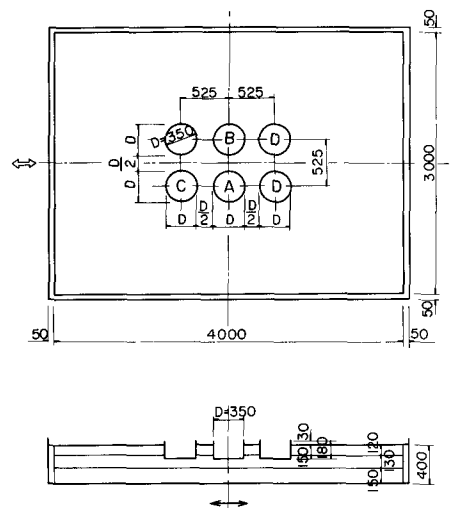


Fig.2 Outline of Model Tanks and Soil Layers

### 3 実験結果

#### (1) 群設による共振特性の変化と地震応答

図-4はタンク底板のスウェイの共振曲線を比較したものである。1基と2基の曲線はほぼ同じ傾向を示しているが、6基の曲線は3.5~6.0Hzの振動数域で異なった傾向を示している。

図-5は、6基の状態で液体に相当する重量の鋼塊をタンクA, B, D(図-2参照)に入れた場合(6W基と略称する)と入れない場合について、タンクAおよびタンクAに隣接するタンクCの共振曲線を比較したものである。タンクAの6基と6W基の曲線はほぼ一致した傾向を示しており、タンク自体の慣性力が群タンクの応答特性に与える影響は小さいと推定される。一方、タンクAとタンクCの曲線は3~5Hzの振動数域で異なった挙動を示している。この振動数域で地盤自体の振りが平面的に一様でなくなるためと考えられるが、その非一様性が模型地盤の側方境界の影響によるものか、タンク群設の影響によるものか、明らかでない。

図-6は、1Hzから10Hzまでほぼ一様な大きさの加速度成分を有するランダム波を入力した場合の、タンク底板スウェイ応答のフーリエスペクトルを示したものである。加速度応答スペクトルで表現しても1次共振点付近の応答が卓越していることから、実地震時には表層地盤の1次共振応答が群タンクの応答に支配的な影響を及ぼすと推定される。

図-7はタンク1基の場合の1次共振点における地盤とタンクの加速度分布を示したものである。既に報告しているように、タンクのスウェイ応答加速度はタンクが根入されている中間層の応答とほぼ等しく表層地盤より小さい。したがって、その差に相当する表層地盤の慣性力がタンクに荷重として作用することになる。図を省略するが6基の場合も同様である。

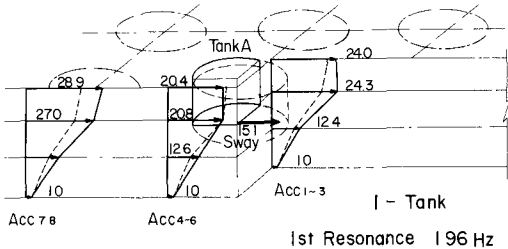


Fig.7 Acceleration Amplitudes of 1-st Resonance (Soil Layer Acc.1-3 & Tank)

#### (2) 応答量の変化

図-8は正弦波で加振した場合のタンクのスウェイ振巾をタンク数との関係で示したもので、タンク数が増加するとスウェイ振巾は低下する傾向を示す。先に述べたように、中間層に根入れされたタンクに対して表層地盤の応答が荷重として作用し

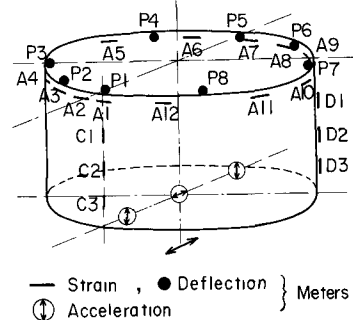


Fig.3 Location of Meters

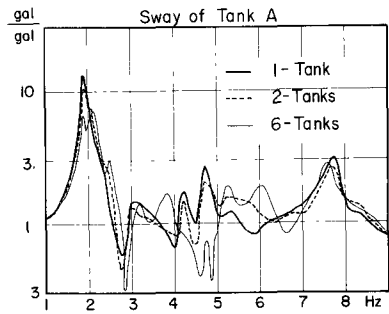


Fig.4 Frequency Response Curves

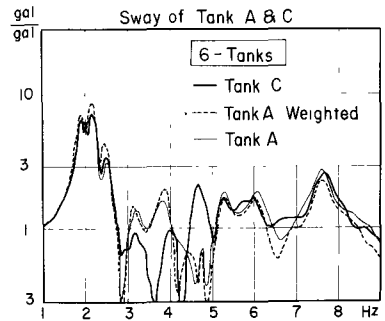


Fig.5 Frequency Response Curves

Fourier Spectrum of Earthquake Response  
Sway Acc of Tank A

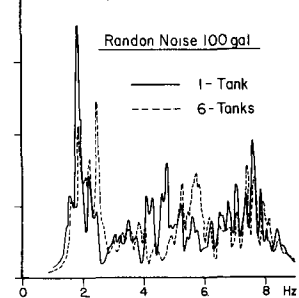


Fig.6 Fourier Spectrums of Earthquake Response

ているので、その荷重がタンク群により分散されたと考えられる。

図-9は代表的な測点について、2種の地震波による最大応答値を平均しタンク1基の場合の応答値で基準化して示したものである。スウェイの傾向は正弦波加振の場合と同様であるが、タンクの円周方向歪は群になることによって増加する傾向にある。

(3) タンクの変形

図-10は、P-1~P-8のタワミ測定値からタンク底板スウェイの1次共振ピーク時におけるタンク壁の平面内変形状態を読み取り、図化したものである。同図には3つの基本的変形パターンを定めて、その影響を〔 〕内に示してある。タンク1基の場合、地盤はタンクを中心として加振直角方向で対称、加振方向で逆対称に変形し、タンク壁の平面内変形はスウェイ〔A〕が卓越したものに成る。タンクが2基になると、隣接タンクの影響を受けて加振直角方向に対称条件がくずれ、ねじれによるオーバリング〔B〕が加わる。タンクが4基になると、群の効果によってスウェイ〔A〕は減少するが加振方向の逆対称条件もくずれるため、〔B〕と共に加振方向の引張圧縮によるオーバリング〔C〕が加わる。ただし、タンクAとタンクCで〔C〕は逆位相となる。6基になるとタンクCの変形パターンは変化しないが、中間に位置するタンクAでは〔B〕だけが卓越する。

以上の傾向をランダム波入力の際の最大応答値からみたものが図-11である。タンクが1基の場合、加振方向のA1点とA7点における軸歪が卓越し、スウェイ〔A〕の変形に対応した歪分布となっている。一方、4基あるいは

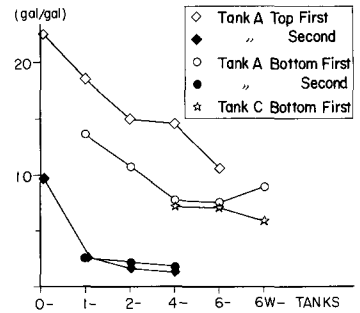


Fig.8 Sway Amplitude vs. Number of Tanks under Harmonic Excitation

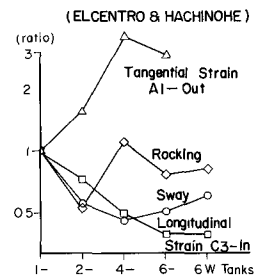


Fig.9 Max. Amplitude vs. Number of Tanks under Earthquake Excitation

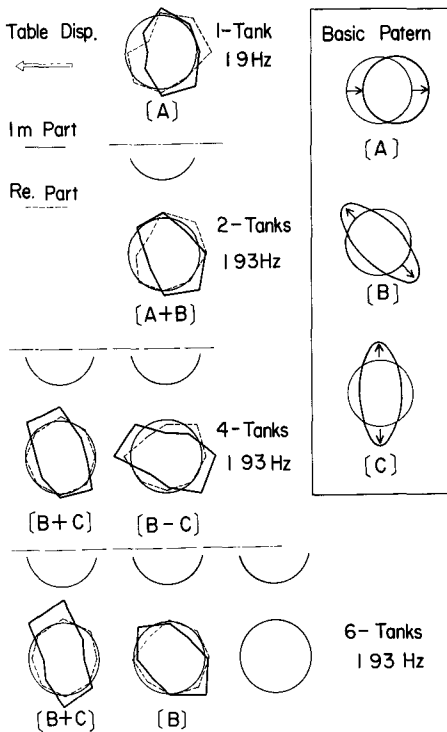


Fig.10 Lateral Deformation of Tanks under Harmonic Excitation

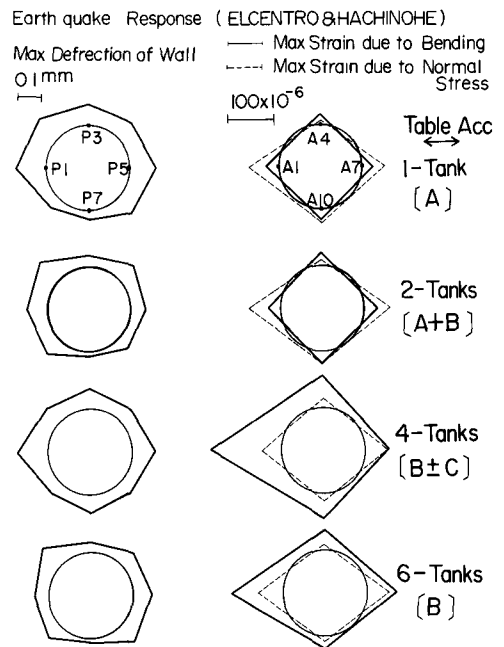


Fig.11 Max. Lateral Deflection and Max. Tangential Strain of Tank Wall under Earthquake Excitation

は6基の場合は軸歪がやや減少し、オーバーリング[B]と[C]に対応した曲げ歪が大きくなる。特に4基では[C]の影響が大きくなり、加振直角方向のA4、A10点における曲げ歪も大きくなっている。

壁のタワミの最大応答値からも同様のことが指適できる。1基の場合は[A]の影響を受けてスウェイ方向のP1とP5が大きくなる。4基の場合はP3とP7におけるタワミも増加しており、オーバーリング[C]の影響を受けていることが示される。2基と6基の場合は45°方向のタワミ量が大きくなっており、オーバーリング[B]の影響が現われている。

#### 4 数値解析結果

JLysmer等によって開発された複素応答有限要素プログラムFLUSHを用いて実験結果のシミュレーションを行なった。地盤は2次元のソリッド要素で、タンクは梁要素でモデル化し、Viscous Boundaryによって3次元の効果を取り入れた。図-12は正弦波を入力した場合のタンクスウェイの1次共振振幅とタンク基数の関係を示したもので、実験結果の図-8に相当する。粗なモデル化であるため定量的な一致は不十分であるが、タンクのスウェイ振幅とタンク基数に関する基本的な傾向は一致しているとみなすことができよう。

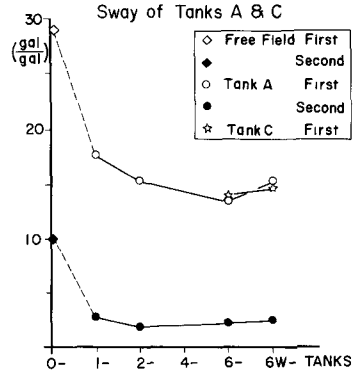


Fig.12 Sway Amplitude vs. Number of Tanks under Harmonic Excitation

#### 5 結論

- (1) タンクが群設されることによる共振特性の変化は比較的高い振動数域に現われる。しかし、タンクの地震応答は地盤の1次共振応答の影響を支配的に受けるため、それ等の変化の影響は小さい。
- (2) 群設されたタンクは群として表層地盤の応答に抵抗する。したがって、タンク数が増加するとタンクを剛体とみなした場合のスウェイ振幅は減少する。
- (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が不均一となり、タンク側壁にオーバーリング変形が生じる。そのため、タンク側壁に作用する円周方向歪はタンク1基の場合より大きくなる傾向にある。
- (4) 群タンク中の個々のタンクの変形形状は、スウェイ[A]、セン断によるオーバーリング[B]、引張圧縮によるオーバーリング[C]の3種の変形パターンの組合せで構成されている。したがって、タンク側壁の応力をチェックするにはこれ等の変形パターンに対する検討が心要である。
- (5) 以上の結論は、0.5Dの間隔で比較的硬い層まで根入れされている群タンクに鉛直下方から地震波が作用する場合について適用できるものである。タンク間の距離の影響、地震波の表面波成分に対する応答などについてはさらに検討が必要である。

#### 謝 辞

本研究の遂行にあたり、(株)大林組技術研究所中川恭次所長、齊藤二郎次長から指導と助力を受けた。また、同研究所吉岡尚也氏には数値解析をお願いした。各位に深謝の意を表する次第である。

#### 参考文献

- 1) 白砂, 後藤「地下タンク模型振動実験について」  
土木学会関東支部第5回年次研究発表会講演概要集 1978
- 2) 後藤, 白砂「沖積地盤における群地下タンクの地震応答特性」  
第5回日本地震工学シンポジウム講演集 1978