

群地下タンクの地震応答特性について

後藤 洋三 白砂 健

On Earthquake Responses of Grouped Underground Tanks

Yozo Goto Takeshi Shirasuna

Abstract

A model test using a vibration table and a numerical analysis using FEM were carried out to study earthquake responses of grouped underground tanks which store petroleum or liquefied natural gas. The objects of the model are six tanks, each an RC cylinder 100,000-kl capacity class, built in alluvium at spacings of 0.5 diameters. The following were confirmed: Coupled vibration of tanks due to inertia itself does not occur. The earth pressure acting on the tanks becomes ununiform due to the influences of neighboring tanks. Because of this, oval deformations of the tank walls are predominant and increase tangential stresses of the walls. Nevertheless, these stress increases are covered in the existing earthquake-resistant design codes.

概要

原油や LNG を貯蔵する地下タンク群を対象として、地盤一群タンク連成系の振動台による模型実験と有限要素法による数値解析を行ない、群地下タンクの地震応答特性の解明と現行耐震設計法の適用性について検討を進めた。沖積地盤のタンクヤードに10万 KL 級の円筒型 RC 地下タンクが0.5Dの間隔で6基まで建設された場合を想定した結果、タンク躯体の慣性力が影響を及ぼし合うようなタンク間の干渉振動は生じないこと、隣接タンクの影響を受けて地盤からタンクに作用する荷重が不均一となりオーバリング変形が増大して側壁に生じる応力が大きくなること、この応力の増加は現行耐震計算法によって包含しうる範囲にあること、等が明らかとなった。

1. はじめに

原油や LNG 等の原燃料を半径と深さが数十メートルにおよぶ円筒型の地下、あるいは半地下タンクに貯蔵するプロジェクトが各地で進められており、この種の構造物の耐震性の向上と設計法の改善が求められている。タンク1基の地震時の挙動については、既に地震観測¹⁾²⁾、模型振動実験³⁾⁴⁾、理論解析³⁾⁴⁾等によって解析が行なわれ、設計手法の整備も進められてきた。しかし、原燃料タンクは限られた敷地内で相互に近接したタンク群として建設されるのが一般的である。そのため、タンクの地震時挙動における群の影響を解明し、耐震設計上の配慮を検討しておく必要がある。そこで著者等は、振動台を使った地盤一群タンク連成系の模型実験と有限要素法による数値解析を行ない、群地下タンクの地震応答特性と群の影響に対する現行耐震計算法の適用性について検討を進めた。実験と解析の対象としては、10万 KL 級の円

筒型 RC 地下タンクが我国の一般的な沖積地盤中に0.5Dの間隔で6基まで建設される場合を考えた。

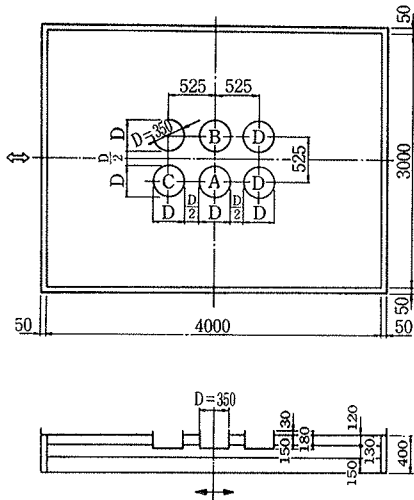
2. 模型実験

2.1. 模型の概要

実物と模型の幾何学的相似性ならびに慣性力と弾性復元力に関する相似則を満足させることを目標とし、振動台の能力を勘案して、図-1に示す地盤一群地下タンク連成系の模型を製作した。

模型地盤の上層は埋立地盤のような軟弱地盤を、下層は比較的硬い地盤を想定して作成した。模型地盤の材料はアクリルアミドゲルで、増粘剤を混和させて減衰の増加をはかっている。地盤側方境界と実験槽壁の間には5cm幅の糊層を全周にわたって設け、模型地盤の動きが拘束されないように配慮した。

図-2は模型タンクと周辺地盤の定数を示したもので、タンクの側壁はシリコンゴムで作成し、底盤は実験手法



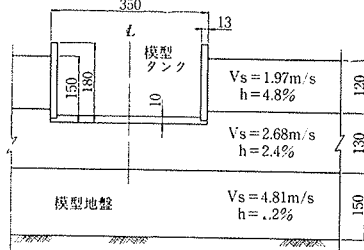
図一 模型の概要

上の都合から剛な塩ビ樹脂板で作成した。底盤と側壁は剛結である。模型タンクを設置する際には、あらかじめ作成されている模型地盤に穴を掘って模型タンクを挿入し、隙間に地盤と同じ硬さのアクリルアミドゲルを注入して固定した。地盤とタンクの剝離を防止するため、タンクの表面に粗砂を張り付けている。

表一は材料定数と相似率を示したものである。模型材料の剛性と密度を調整することにより、慣性力と弾性復元力に関する相似則を満足させた。

2.2. 実験方法

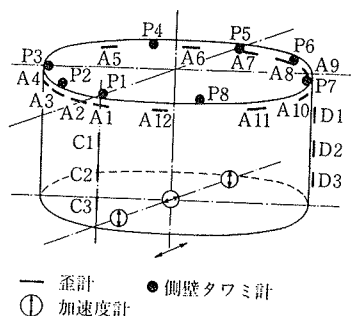
実験は地盤のみ (Free Field), タンク 1 基, 2 基, 4 基, そして 6 基設置の状態で行ない、それぞれ正弦波とランダム波で加振した。計測対象はタンク底盤のスウェイとロッキング, タンク側壁頂部の円周方向歪 (30° ピッチ 12 点, A 1~A 12) と上下方向歪 (0° 断面



図二 模型タンク詳細

相似率		材料定数	
長さ	1/150	地盤のセン断波速度	Vs m/s
密度	1/1.7		
セン断波速度	1/50	表層	1.97
時間	1/3	中間層	2.68
加速度	1/16.7	基層	4.81
変位	1/150	タンク側壁のヤング係数	E kg/cm ²
歪	1/1		

表一 相似率と材料定数



図三 タンクの測定点

C 1~C 3, 90° 断面 D 1~D 3), そして側壁頂部のタワミ (45° ピッチ 8 点 P₁~P₈, 底盤と側壁頂部の半径方向相対変位) である。また、地盤内加速度も多点測定した。

側壁のゴムに接着する歪計はゲージ長が長くベースの薄い箔ゲージを使用した。別途に用意したゴム板に接着し引張り試験を行なった結果、指示歪は実歪の約 1/2 であった。

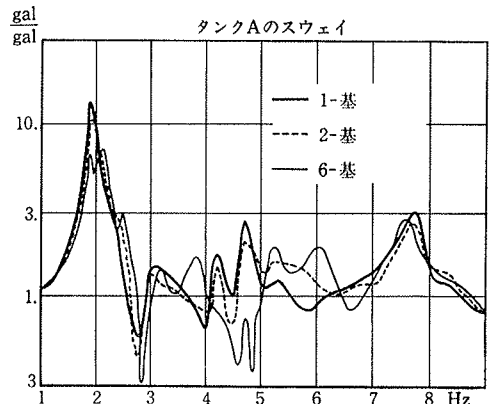
2.3. 実験結果

得られたデータの中からタンク同士の干渉振動, タンクに挟まれた地盤の共振現象, およびタンク側壁の変形と歪に及ぼす群の影響について結果を報告し、考察を述べる。

2.3.1. タンク同士の干渉振動 中間に位置するタンク A のスウェイの共振曲線について、1 基 (A のみ設置) の場合と 2 基 (A と B 設置) の場合、ならびに 6 基の場合を比較したものが図一 4 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 3.5~6.0 Hz の振動数域で異なった傾向を示している。

タンク間の相互作用の影響を調べるため、6 基の場合のタンク A とタンク C についてスウェイの共振曲線と位相曲線を比較したものが図一 5 である。振幅、位相共に 3~5 Hz を除いてよく一致しているが、3~5 Hz では両タンクが逆位相の振動をする場合もある。

6 基の状態で内容液の重量に相当する鋼塊を底盤に取り付け実験した結果から、タンク A と C の結果を比較したものが図一 6 である。高い振動数域で両タンクの差が大きくなる傾向を示すが、全体的な傾向は図一 5 とよく一致している。特に、3~5 Hz の傾向はタンクの慣性力が増加しているにもかかわらずほぼ同じである。一方、Free Field の実験から、側方境界の影響のために 3~5 Hz で地盤は平面的に複雑な振幅分布を持つことが確かめられている。さらに、図一 5 と図一 6 においてタンク A あるいは C の振幅が大きくなる 3.15 Hz と 3.9 Hz な



図四 タンク A の共振曲線

らびに 4.7 Hz の位相に注目すると、振動台に対する位相遅れはいずれも約 90° である。これ等の結果から、3~5 Hz の複雑な現象は地盤の影響によるものであると推察され、慣性力の影響によるタンク同士の干渉振動は生じていないと判断される。

2.3.2. タンク間の地盤の共振現象
 模型地盤中央（タンク A とタンク B の中間点）における地表面加速度の共振曲線と位相曲線について、タンク 1 基の場合と 6 基の場合を比較して示したものが図-7 である。6 基の場合の 6 Hz 付近で 1 基の場合にはみられなかったピークが現われており、その位相遅れは約 270 度である。すなわち、タンク間の地盤がタンク群に囲まれることによって独立した振動系を構成し、その共振点のひとつが 6 Hz である。

図-8 に円周方向の歪測点の中で 6 Hz における値が大きくなる測点の共振曲線を示した。相対的に見て 6 Hz のピークは大きいものではないことが示される。

実地盤の減衰が模型地盤より大きくなることを考慮すれば、実際の現象ではタンク間地盤の共振の影響は無視しえるものと思われる。

2.3.3. 側壁の歪に対する群の影響
 ランダム波を入力した際の歪の絶対値の最大値を積み取り、歪計の指示率を考慮して 2 倍にした値をプロットしたものが図-9 と図-10 である。EL-CENTRO 波と八戸波（時間軸の短縮を行っていない）の結果を平均したものが図-9 で、1~10 Hz の間でほぼ一様な加速度スペクトルを有するランダムノイズを入力した場合が図

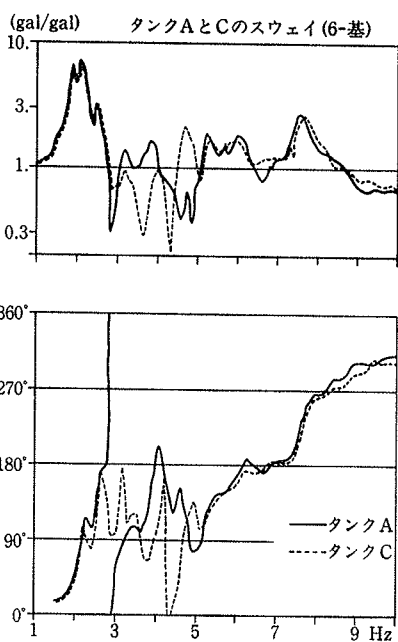


図-5 6 基の場合の共振/位相曲線

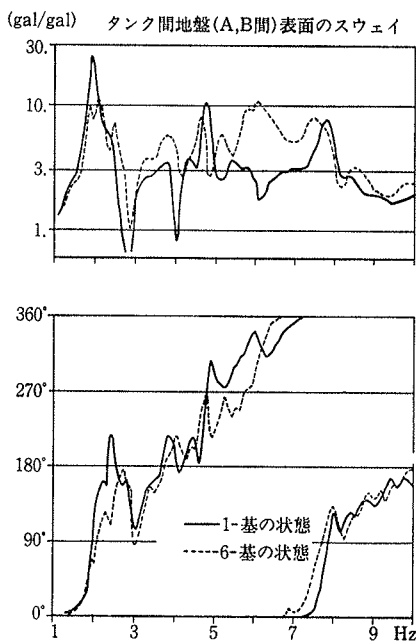


図-7 6 基の場合の共振/位相曲線

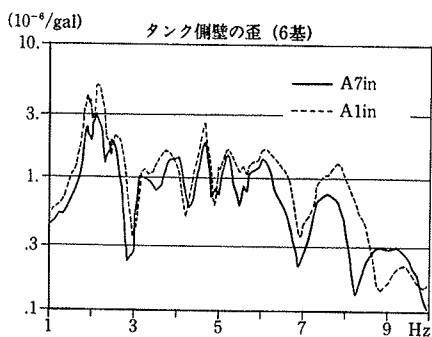


図-8 6 基の場合の側壁歪共振曲線

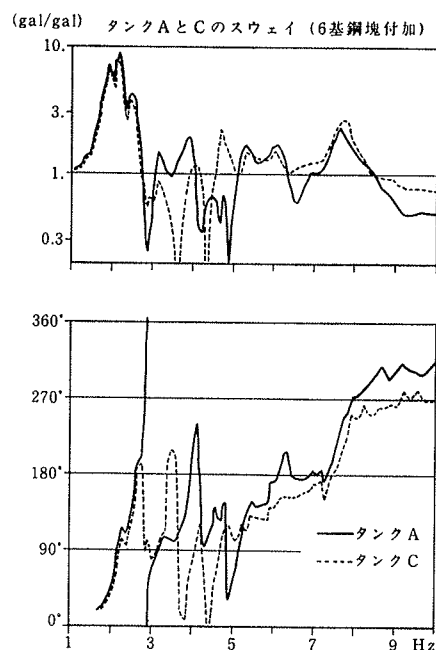


図-6 鋼塊付 6 基の共振/位相曲線

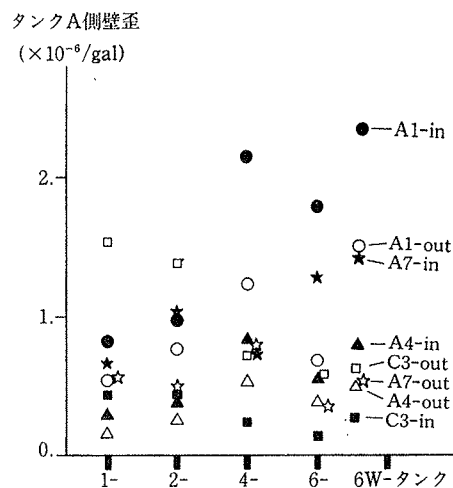


図-9 側壁歪とタンク基数 (地震波入力)

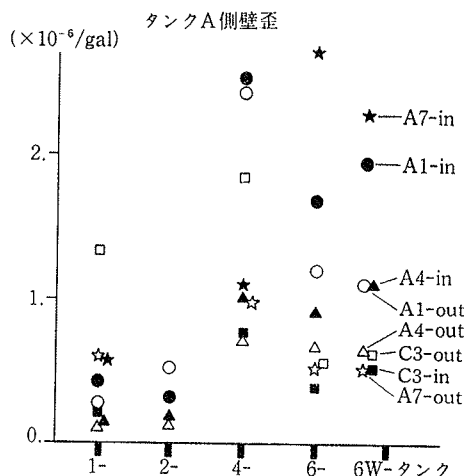


図-10 側壁歪とタンク基数 (ランダム入力)

—10である。両図はほぼ同じ傾向を示し、タンク基数の増加に伴って一部の歪は減少するが円周方向の歪は一般に増加していくことが示される。

このような歪の増加傾向を説明するため、応答値に最も大きな影響を持つ1次共振点についての側壁タワミモード読み取り結果を図-11に示した。同図には仮に三つの基本変形パターンを定義し、そのかわりを〔A〕内に示してある。タンクが1基の場合は地盤がタンクを中心として加振直角方向に对称、加振方向に逆対称に変位するので、タンクのタワミはスウェイ〔A〕が卓越したものになる。タンクが2基の場合は加振直角方向の对称条件が崩れるためセン断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崩れるため、〔B〕と共に引張圧縮によるオーバリング〔C〕が加わる。6基になると角に位置するタンクCの変形パターンは4基の場合と同様であるが、中間のタンクAでは〔B〕だけが卓越する。

オーバリング〔B〕と〔C〕では円環の曲げ変形が卓越することになるので、〔B〕と〔C〕の発生が円周方向の歪の増加に関係していると思われる。

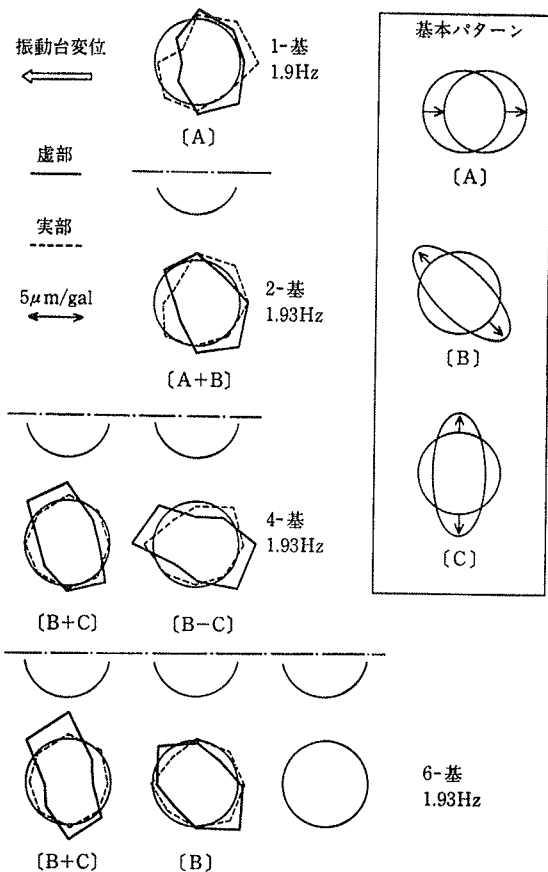


図-11 側壁頂部のタワミモード (実験値)

3. 数値解析

3.1. 模型実験の解析

3.1.1. 解析方法 模型実験の内容を忠実に解析するためには複雑な境界条件を考慮した3次元の解析を行なう必要がある。本研究では有限要素法を適用することとし、汎用構造解析プログラム SAP-V⁵⁾によって解析を行なった。模型地盤は3次元のソリッド要素でモデル化し、タンク躯体は板要素でモデル化した。

図-12にタンク1基の場合、図-13にタンク6基の場合の解析モデル図を示している。加振方向に逆対称、直角方向に对称の条件を利用した1/4モデルであるが自由度が多く、動的解析を行なうためには莫大な計算時間を必要とする。そのため、モデルに一樣な水平加速度を作用させ応答を静的に計算する方法(震度法)を取ることとした。

従来から、地中構造物の地震応答には地盤の歪が大きな影響を持ち構造物自体の慣性力の影響は小さいとされている。したがって、地盤の歪が適切に求められていれば、静的な計算によって近似的に地震応答を求めることが可能となる。この点を確認するため、タンク1基の場

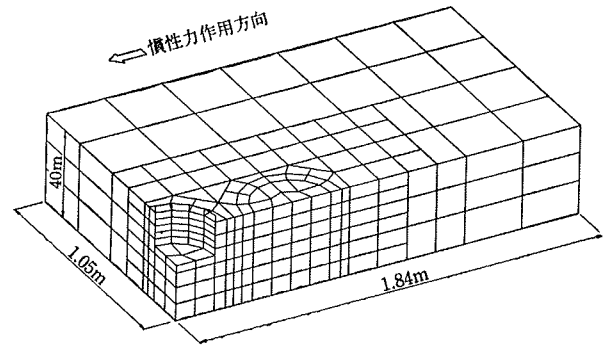


図-12 タンク1基のモデル

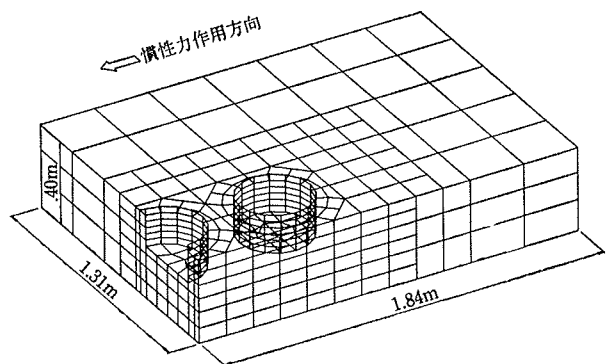
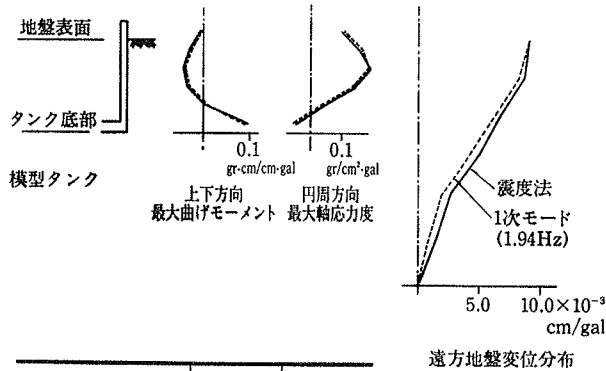


図-13 タンク6基のモデル

合について震度法による応答値と動的解析から求められた一次モードによる応答値とを比較してみた。比較にあたってはタンクから離れた地盤表面の変位が一致するように基準化した。表-2と図-14がその結果である。図-14から明らかなように地中の変位分布は震度法の方が大きくタンクのスウェイも震度法の方が大きくなる。しかし、側壁の歪はほぼ一致しており、地下タンク地盤



	震度法	1次モード
遠方地盤表面変位 (cm/gal)	9.03×10^{-3}	9.03×10^{-3}
タンク底部水平変位 (cm/gal)	5.82×10^{-3}	4.98×10^{-3}

表-2

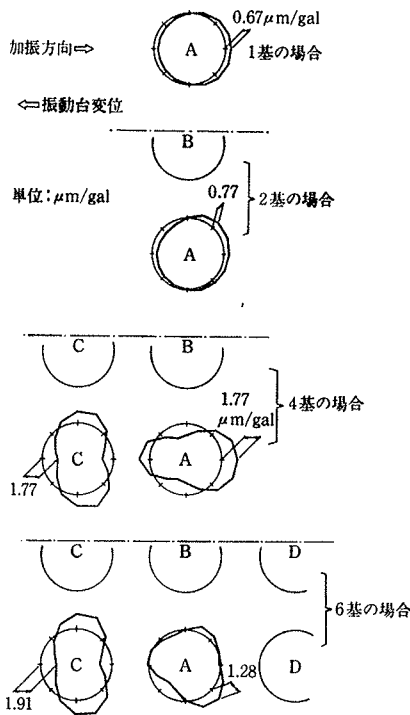


図-15 側壁頂部のタワミモード (計算値)

連成系においても1次モードの応答が主となる限りは震度法による解析が可能である。

3.1.2. 解析結果 図-12と図-13に例示したように、タンク1基から6基の場合についてそれぞれ解析モデルを作成し計算を行なった。それ等の結果から側壁のタワミモードを求め、図-11の実験結果と比較できるように示したものが図-15である。実験の精度を考慮すれば、計算結果は実験結果とほぼ一致した傾向を示しているとみなすことができよう。

図-16は側壁の歪とタンク基数との関係を示したもので、実験結果の図-9、図-10に相当する。実験結果は地震波によるもので入力条件が同一でないことを考慮すれば計算結果は実験結果と一致したとみなすことができる。4基の場合のC₃が減少しているのは隣接タンクに接した側にあるためで反対側では増加している。

3.2. タンク間距離に関する解析

タンク4基の場合を例に取り、タンク間距離が0.5D、0.75D、1Dの解析モデルを作成して3.1.と同様の計算を行なった。計算結果から側壁のタワミモードを求めて図示したものが図-17である。タンク間距離が大きくなると群の影響は小さくなるのでオーバリングは減少する傾向を示す。

図-18はタンク側壁頂部と底部における同一円周上の歪の最大値とタンク間距離との関係をタンク1基の場合との比較で示したものである。タンク1基の場合にはタンク間距離無限大に相当するので、タンク間距離が大きくなると各歪の値はタンク1基の場合に収束する傾向を示す。

タンク間距離が小さくなると円周方向歪だけでなく上下方向歪も増加して図-16と異なった傾向をしめしてい

タンクA側壁歪 (×10⁻⁶/gal)

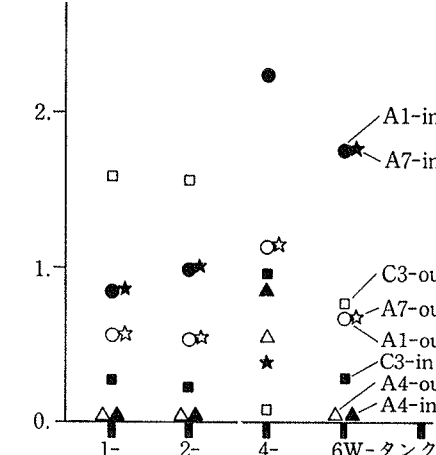


図-16 側壁歪とタンク基数

加振方向⇒, 単位; μm/gal

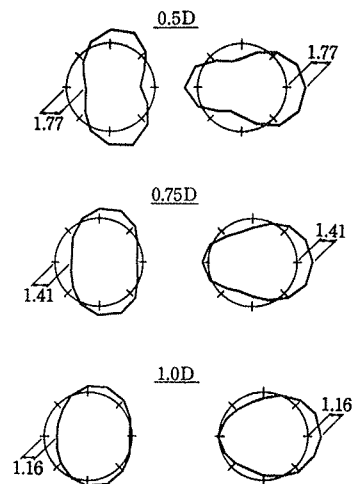


図-17 タンク間距離とタワミモード

る。これは同一円周上の最大値を取っているため、オーバーリングに伴って生じる側壁上下方向の曲げ歪が軸歪に加わるためと考えられる。

3.3. 現行設計計算法の検討

実際の地下タンクの耐震設計においては応答変位法と偏土圧法^{6)~8)}によって断面応力が計算されている。応答変位法における片押し、片引きの場合を群の影響のない単一タンクの場合と考え、両押しの場合と偏土圧法による場合を群の影響が加味された場合と考えれば両者の比較を行なうことができる。実際の設計計算例からこれ等の計算値を取り出し、図-18と比較できるように片押し片引きを基準に取って示したものが図-19である。タンク間距離が0.5Dの場合と偏土圧法の場合あるいは応答変位法の場合を比較すると、後者等の方が大きな増加割合を示している。一例のみの比較で一般的な結論は引き出せないが、側壁の応答に関する限り偏土圧法と応答変位法の両押しによって計算を行なっておけば群の影響は

考慮されたことになると思われる。

4. 結論

(1) タンクが群設されてもタンク間の干渉振動は認められなかった。また、タンク間の地盤がタンクに囲まれることによって共振現象を呈したが側壁の応答に大きな影響はなかった。したがって、群タンクの場合においても単一タンクの場合と同様にタンク周辺地盤の応答と歪がタンクの応答を決定していると考えられる。

(2) 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非対称となり、タンク側壁にオーバーリングが生じて曲げ変形が卓越する。そのため、側壁の応力はタンク一基の場合より大きくなる。タンク間距離が小さくなるとその傾向は著しくなり、0.5Dの場合の側壁歪は一基の場合の2~3倍となる。

(3) 応答変位法(両押し)と偏土圧法における荷重の取り方は群の影響を包含したもののみなすことができる。これ等の計算法によって側壁の設計を行なっておけばタンク間距離が0.5Dの場合においても別途に群の影響を考慮する必要はないと思われる。

5. むすび

以上に述べた結論は代表的な地盤条件とタンク形状のモデルに対して地震波が鉛直下方から作用する場合を検討して得られたものである。地盤の非弾性的性質の影響も含め、さらに一般的な問題について検討を進めることが今後の研究課題になると思われる。

参考文献

- 1) 倉橋君夫, 他: LNG 地下式貯槽における地震震測, 土木学会第35回年次学術講演会講演概要集第1部, (1980.9), pp. 564~565
- 2) 浜田政則: 大型地下タンクの地震時挙動の観測と解析, 土木学会論文集, No. 273, (1978.5), pp. 1~14
- 3) 岩楯敏広, 他: 地下タンクの耐震性の検討, 第5回日本地震工学シンポジウム, (1978), pp. 969~976
- 4) 後藤洋三, 白砂 健: 回転体有限要素法による地下タンクの地震応答解析, 大林組技術研究所報, No. 19, (1979), pp. 24~28
- 5) Bathe, et al.: SAPIV, EERC Report, 73-11
- 6) 土木学会: 地下貯油施設技術指針(案), (1980)
- 7) 日本瓦斯協会: LNG 地下式貯槽指針, (1979)
- 8) 電気事業連合会: LNG 地下式貯槽(土木設備)設計指針, (1978)

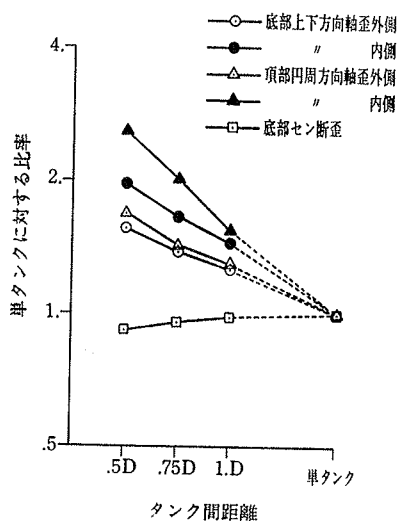


図-18 タンク間距離と側壁歪

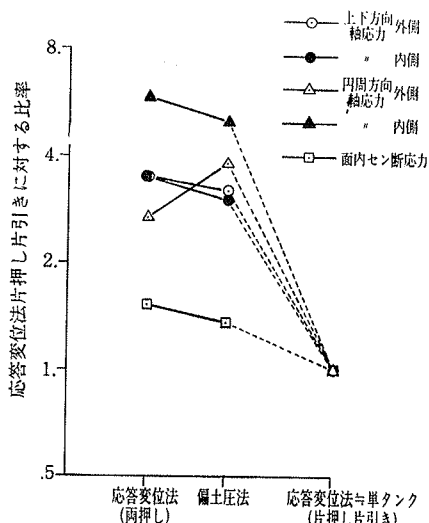


図-19 設計計算法と側壁断面応力