

(66) 3次元有限要素法を用いた群設地下タンクの動的挙動について

フジタ工業 技術研究所 正員 斎藤 悦郎

§-1 はじめに

円筒形地下タンクの耐震性に関する研究は、室内・屋外模型実験、解析及び地震観測など各方面で進められている。その動的挙動は、タンクのみかけの質量が地盤の質量に比べ小さいため、タンク自身が固有の動きをせず、地盤の動き（変位）による影響が支配的であることが定性的な考え方となっている。備蓄、コンビナート基地等においてタンクを建設する場合、数基、数十基の群として計画されることが多い。上述の耐震性に関する研究では、タンク1基のみを対象としたものがほとんどであり、地盤の影響を強く受ける地下タンクの群設によるタンク-地盤-タンク間の動的相互干渉効果について、十分検討を加えておく必要があるものと考えられる。任意配置された群設地下タンクに対して、振動方向（直列）および振動直角方向（並列）に配列された2基、3基を基本的配列とし、筆者が行った有限要素法を用いた数値解析^{*1)}から、タンク間距離 $D/2$ （ D ：タンク直径）程度の並列配列においては、2基、3基ともほとんどタンク1基と等しい振動挙動となるが、直列配列では、とくにタンク3基の場合、1基に対しかなり大きな断面力がタンク側壁に生ずることが明らかになった。したがって任意に配置されたタンク群の動的相互干渉効果については、仮定した振動方向に直列配列されたタンク列のみに対し、検討を加えることで十分であることが考えられる。本報告は、直径60m級の地下タンク3基が直列に群設された場合のタンク間の動的相互干渉効果について、タンク間距離をパラメーターとし、等しい入力加速度により生ずるタンク1基の応答量を基準に、有限要素法を用いた検討を行ったものである。

§-2 解析手法および解析モデル

有限要素法による3次元動的解析の固有値計算には、サブスペース法を用い、また周波数応答解析には、モード合成法を用いた。モデルケースは、地盤のみ（ $M0$ ）、タンク1基（ $M1$ ）、および3基のタンク間距離 $3D/4$ 、 $D/2$ 、 $D/4$ 、（ $M3-3D/4$ 、 $M3-D/2$ 、 $M3-D/4$ ）で地盤材料は、それぞれのモデルケースに対し、1層の $V_s=150\text{m/sec}$ の軟質地盤および $V_s=250\text{m/sec}$ の硬質地盤とした（表-1）。タンク寸法は、直径60m、深さ30m、底版厚5m、側壁厚1.5mで、地盤の形状寸法、要素分割は図-1に示した。要素特性は、地盤に対し、セリ断変形を考慮した9個の非適合変位モードによる8節点3次元要素、またタンク側壁底版に対しては、4辺形シェル要素を用いた。地盤の境界条件は、振動方向に対し、自由境界、直角方向に対しては、固定境界とした。なお周波数応答計算に用いる入力加速度は、地盤底に対し100galとした。

表-1 材料定数

	タンク	軟質地盤	硬質地盤
ヤング率(t/m^2)	2.70×10^6	12,000	33,000
ポアソン比	0.167	0.45	0.45
単位体積重量(t/m^3)	2.40	1.80	1.80
減衰定数(η :%)	10	10	10

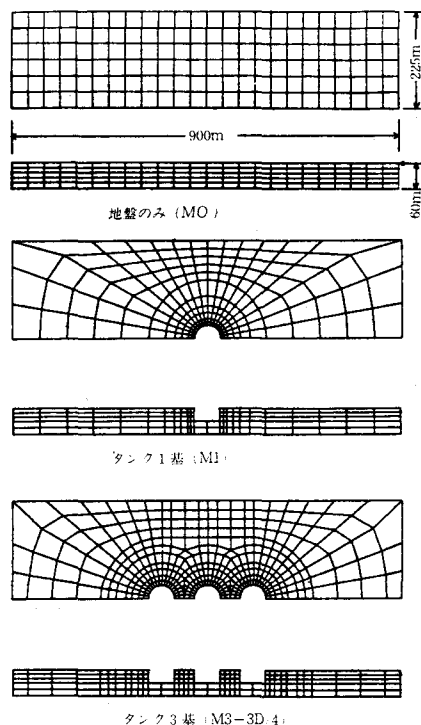


図-1 解析モデルおよび要素分割

§-3 解析結果

軟質地盤、硬質地盤のタンク間距離をパラメーターとしたタンク1基に対する応答量の比率および傾向は、ほとんど同様となるため、以下軟質地盤について報告し、3-5においてその量的な比較を行なう。

3-1 周期特性 地盤のみ(M0),

に対しタンク1基, 3基のタンク間距離 $D/4 \sim 3D/4$ においても地盤セン断振動数は, ほとんど変化なく, 0.610 Hzとなる。また地表面およびタンク側壁頂部の変位応答倍率による地盤セン断1次付近の共振曲線形状もほとんど同様となり, タンク質量による振動数領域への影響は, 非常に小さいものと考えられる(図-2)。

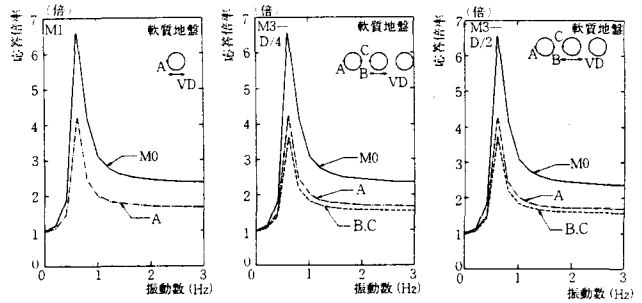


図-2 共振曲線

3-2 変位特性 地盤モデルの境界, 特に振動方向自由

境界の条件による影響は, 振動方向境界付近で地盤がハネ上がる動きとなり, 水平変位量も大きくなるが, 地盤のみの場合, モデル中央位置よりタンク直径の4倍程度まで一定値となり, この範囲においては, ほとんど境界の影響を受けないものと考えられる(図-3)。タンク側壁頂部の変位, タンク底版に対する頂部の相対変位を図-4, 図-5に, またタンク底版の水平変位回転角を図-6に示した。タンク-地盤-タンク間(M, C)の変位, 相対変位ともタンク1基と比較して小さくなり, タンク間距離が離れるに従い(1D程度)タンク1基の変位, 相対変位

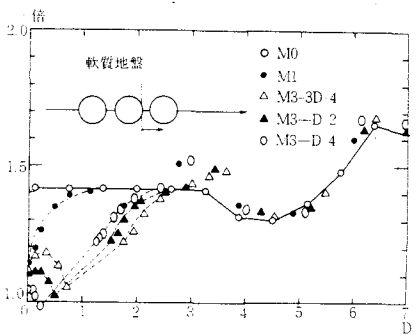


図-3 タンク底版水平位置に対する地表面振動方向タンク直径軸上の応答倍率

に近づく。また底版の水平変位, 回転角とも, 中央タンク水平変位以外は同様な傾向となる。C点の相対変位がB点の相対変位に比べ大きくなる原因としては, 中央タンク底版が, 両端タンクの拘束を受けタンク間距離 $D/4 \sim 3D/4$ 程度においても水平変位量の変化がほとんどなく, タンク1基, 両端タンク底版水平変位と比べかなり小さいこと, またとくに中央タンク底版の回転角は, タンク間距離が近づくことにより急激に小さくなることによるものと考えられる。タンク-地盤(A)では, タンク間距離が近づくことにより, 変位, 相対変位とも小さくなることは, B, C点と同様な傾向であるが

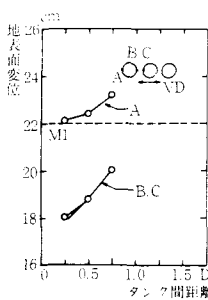


図-4 タンク頂部の変位

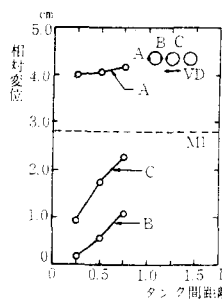


図-5 タンク底版に対する頂部の相対変位

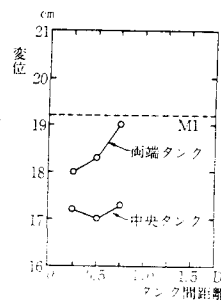


図-6 タンク底版の水平変位・回転角

と同様な傾向であるがタンク1基と比較して大きくなる。

3-3 地表面応力

各モデルケースに対する地表面の振動方向最大軸応力(σ_{max}), 最大セン断応力(τ_{max})および振動方向タンク直径軸上のタンク側壁付近の軸応力($\sigma_{\theta=0, 180}$)を表-2に示した。また図-7, 図-8にタンク1基および3基のタンク間距離 $D/2$ における振動方向軸応力(σ), セン断応力(τ)のコンターラインを示した。最大セン断応力位置は, 各モデル同様で, 振動方向直角のタンク直径軸上タンク側壁付近で, 側壁から離れるに従い急激に減少し, 0.5 D程度で, 最大セン断応力の10%以下となる。またタンク間にはさまれた地盤では, 最大セン断応力の20~30%程度となる。最大軸応力位置も, タンク間距離の影響を受けず, 振動方向タンク直径軸上に対し 45° 方向に生ずる。タンク3基の最大セン断応力値は,

タンク間距離D程度ではほぼタンク1基と同様となるが、タンク間距離が近づくに従って大きくなる。最大軸応力値は、タンク3基の両端タンクにおいては、タンク間距離が近づくに従って、タンク1基に比較して大きくなる。中央タンクでは、タンク間距離による変化は、ほとんどなく、タンク1基と比較して小さな値となる。しかしながら振動方向タンク直径軸上のタンク側壁付近の振動方向軸応力 ($\sigma_{\theta} = 0, 180$) は、タンク間距離が近づくに従って小さな値となる傾向となり、タンク3基A点(地盤-タンク)側壁付近では、タンク1基と比較し大きな値となるのに対し、B,C点(タンク-地盤-タンク)側壁付近では、かなり小さな値となる。

表-2 地表面応力

MODEL	STRESS t/m^2	σ		$\tau_{\max}$	
		$\theta=0$	$\theta=180$	$\theta=45$	$\theta=90$
M1		15	15	18	12
M3-D/4	L,R	18	2	27	17
	M	1	1	12	16
M3-D/2	L,R	19	3	26	14
	M	6	6	12	13
M3-3D/4	L,R	20	5	25	12
	M	9	9	12	11

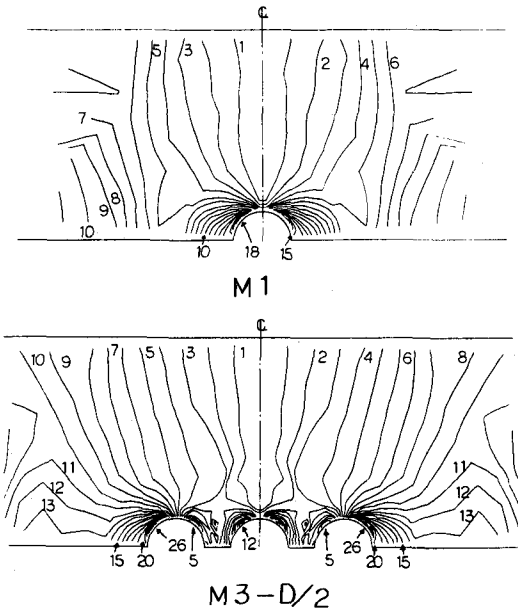


図-7 地表面振動方向軸応力(σ)分布 (t/m^2)

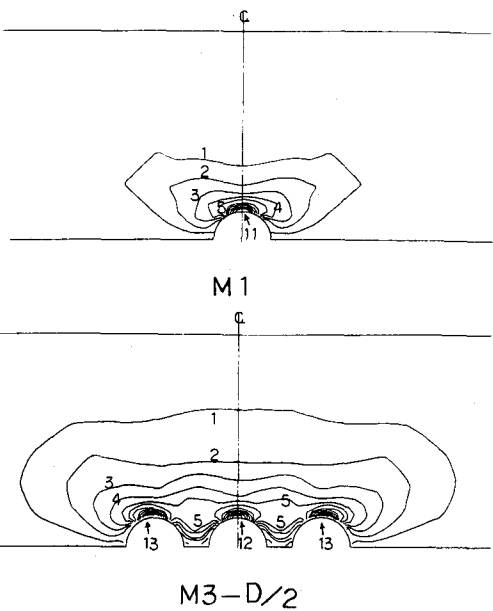


図-8 地表面せん断応力(τ)分布 (t/m^2)

3-4 タンク側壁断面力 タンク側壁断面および断面力方向の名称を図-9に示した。鉛直方向軸力分布、鉛直方向モーメント分布、円周方向軸力分布は、各モデルとも円周方向に1回の正負をくり返す形状となる。しかしながら円周方向モーメント分布は、3基両端タンクで円周方向に2回の正負をくり返す形状、また中央タンクでは、3回の正負をくり返す形状となり(図-10)、地盤セン断変形においても、円周方向に複雑な分布形状となりうる。円周方向の最大断面力位置は、鉛直方向軸力の様にならずしも振動方向タンク直径軸上とはかぎらない。円周方向の最大断面力が振動方向タンク直径軸上となる。両端タンクの鉛直方向モーメント、円周方向軸力では、地盤-タンク(A)点位置となり、また両端タンクの円周方向モーメントでは、タンク-地盤-タンク(B)点位置となる。各断面円周方向の最大断面力のタンク間距離($D/4 \sim 3D/4$)による影響は、中央タンク、両端タンクとも同様な傾向を示し、円周方向軸力、鉛直方向モーメントでは、ほとんどタンク間距離の影響を受けず一定値となる。また鉛直方向軸力では、タンク間距離が近づく

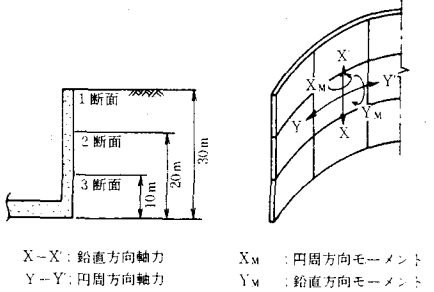


図-9 タンク側壁断面および断面力方向の名称

に従がい小さな値となるのに対し、円周方向モーメントでは、タンク間距離が近づくに従がい急激に大きくなる(図-11)。タンク間距離 $D/4 \sim 3D/4$ における各断面の最大値は、中央タンクの円周方向軸力、鉛直方向軸力、鉛直方向モーメントでは、タンク1基と比較して小さくなる。また両端タンクの円周方向軸力、鉛直方向軸力、鉛直方向モーメントでは、タンク1基より大きくなるが、1.5倍以内である。円周方向モーメントは、タンク間距離の影響を受け、タンク間距離 $D/4$ において中央タンクで4倍、両端タンクで5.5倍とかなり大きな値となる(図-11)。

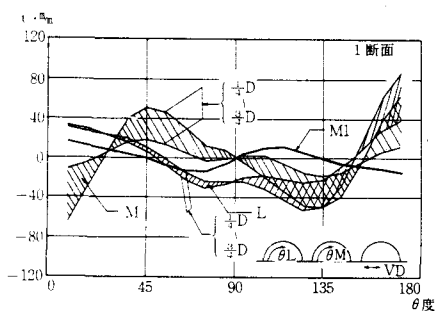


図-10 円周方向モーメント分布(1断面)

3-5 タンク周辺地盤剛性の相違による影響
タンク周辺地盤の相違(表-1)によるタンク-地盤-タンク間の動的相互干渉効果の差について比較を行なうと、前述した様に、タンク1基を基準とした、変位応答、地盤応力、および側壁断面力の比率は、ほとんど同様な値を示し、タンク間距離をパラメーターとした傾向も同様となる。しかしながら、群設による動的相互干渉効果を大きく受けるタンク側壁頂部付近の円周方向モーメント(3-4)では、周辺地盤の剛性が高くなることにより、タンク1基に対する比率が増加(タンク間距離 $D/4$ の中央タンクで5.5倍、両端タンクで7倍)する(図-12)。

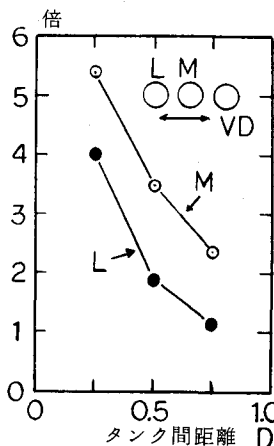


図-11 タンク1基に対する円周方向モーメント

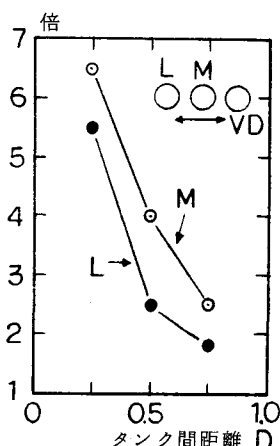


図-12 タンク1基に対する円周方向モーメント(硬質地盤)

§-4 まとめ

振動方向に配置された群設地下タンク3基のタンク-地盤-タンク間の動的相互干渉を、タンク1基の応答量を基準に、またその効果をより明らかにするため、タンク間距離をパラメーターにとり、3次元有限要素法を用い検討を行った。タンク間のタンク頂部変位量は、タンク間距離が近づくに従がいタンク1基より小さな値となる。また底版の水平変位、回転角においても同様な傾向となり、とくに中央タンク底版では、両端タンク底版の拘束を受けかなり小さな値となる。この変位挙動は、タンク側壁鉛直方向軸力に影響を与え、群設による相互干渉としてタンク1基よりむしろ小さくなる傾向となる。タンク側壁周辺地盤の振動方向軸応力値は、タンク間距離の変化においてもあまり変わらず、この挙動は、タンク円周方向軸力に影響を与えるものと思われ、タンク間距離の変化においても同断面力の大きな変化は生じない。タンク周辺地盤の振動方向軸応力分布は、平面的にタンク側壁付近で応力が集中し、タンク側壁円周方向に大きな応力差が生じ、タンク1基に対しその変化量がかなり大きくなる。この挙動は、タンク円周方向モーメントに影響を与えるものと思われ、タンク間距離が近づくに従がいタンク1基と比較してかなり大きな同断面力(5~7倍)が生じ群設タンクの動的相互干渉の影響を強く受けるものと考えられる。しかしながら同断面力においてもタンク間距離がタンク直径程度離れていれば、ほとんどタンク1基と同様な値となる。また周辺地盤の剛性の相違によるタンク側壁断面力への影響は、円周方向モーメントに対して大きくあらわれる。

* 参考文献

- 1) 斎藤・中村・山県 円筒型地下タンクの動的挙動(Ⅲ) 第35回土木学会概要集
- 2) 吉沢・平沢 汎用プログラムSRANの開発と計算例 第2回電算利用シンポジウム論文集
- 3) 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15回地震工学研究発表会
- 4) 辰己・鈴木・畑中 軟弱地盤における群地下タンクの地震応答解析 第35回土木学会概要集
- 5) 鈴木・江川・高比良 海岸埋立地に設けられた地下タンクの模型振動実験(Ⅰ) 第33回土木学会概要集