

鹿島建設 技術研究所 ○正会員 村山八洲雄

〃 山下茂

〃 正村芳久

1. まえがき 石油タンクやその基礎の耐震設計にあたっては、一般にタンク内液の地震時動液圧に起因する地震時作用力を想定している。地震時動液圧としては内液の動搖による“振動圧”と“衝撃圧”が一般的であるが、最近ではこれらに加えてタンク軸体のバルジングによる“変形圧”が重要視されている。このような地震時動液圧をもたらす現象は、この他にも幾つか考えられ、その一つにタンク軸体端部の浮上り振動が挙げられる。しかし、その研究例は僅かであり、耐震設計での関心事までには至っていない。そこで、この浮上り振動に注目し、タンク底板の剛性や支持条件ができるだけ実際に応した模型を用いて振動台実験を行ない、浮上り振動特性を調べてそれが耐震設計上、重要な要素となるかどうかを検討した。

2. 実験方法 実験では、容量が3万KL程度、側壁高と直径の比が約0.5でドーム式屋根を具備する石油タンクを想定し、模型は図-1に示すように直径1.2mで形状が実タンクと相似形になるようにした。模型の側壁とドームは、そのたわみ剛性を実タンク相当値より大きめにしてバルジングが発生しないようにするとともに、浮上り振動に伴う応力測定ができるように、6mm厚のアクリル板を用いて製作した。一方、底板はその剛性がタンクの浮上り振動に密接に関係すると考えられるので剛性が実タンク相当となるように0.2mm厚の銅板を使用した。

支持条件としては、マウンドの変形効果を含めるため弾性材料のクロロブレンゴムマットを用いた場合と、対比のため剛支持に相当する數モルタルの場合の2ケースを選び、いずれも模型タンクは載せるだけで、基礎部分との付着が無い状態とした。ゴムマットの剛性は、上載圧に対する沈下量が実タンクと相似になるようにした。マウンド下の基礎地盤相当部分は、基礎地盤の変形に起因する軸体のロッキング振動が含まれないようにするため、剛体として振動台の剛テーブルがこれに相当するようにした。内液としては水を使用し、満液時を想定して水深を50cmとした。

ここで、実タンクと模型タンクの内径寸法相似比として36を選ぶと加振加速度が同じのとき、スロッシングの液面高さおよび動液圧の相似比は36、固有周期の相似比は $\sqrt{36}$ 、側壁の鉛直方向軸力（最下端では基礎マウンドに作用する単位長鉛直軸力に相当）の相似比は $(36)^2$ となる。

加振方法としては、水平方向加振とし、まずランダム波加振により概略の固有振動特性を把握した。そして内液動搖の低次振動領域では1次～3次固有振動数に対応した正弦波で加振し、また高次振動領域では振動数が5～30Hzの範囲で正弦波加振した。地震波の一例としてエルセントロ波(1940, NS成分、時間縮尺1/6、最大加速度300gal)を用いて加振した。測定は軸体の加速度、タンク内動液圧および軸体ひずみについて行なった。

3. 実験結果

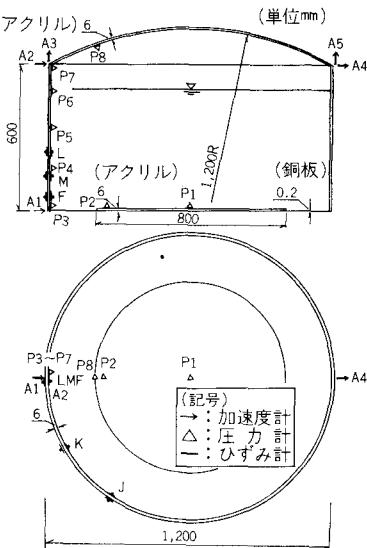


図-1 模型タンク概要

	動弾性係数 (kg/cm²)	動ボアン比
アクリル樹脂	4.7×10^3	0.34
銅板	1.3×10^6	0.34
クロロブレンゴム	40	—

表-1 模型材料の特性

(1) 内液動揺の低次振動における正弦波加振の場合

スロッシングの1次(0.83Hz)～3次の動液圧分布は、並進振動する剛なタンクに関して速度ポテンシャル理論による慣用式で計算した値に一致し、後述の浮上り振動時相当の動液圧の大きさになつても、浮上り振動は殆んど励起されないことがわかった。

(2) 内液動揺の高次振動における正弦波加振の場合

加振加速度を100galとして振動数を種々変えていくと、動液圧分布は図-2に示すように、並進振動としてのHousnerの式を適用した計算値よりも大きくなる場合がある。この現象は、図-3の動液圧および駆体応答加速度の共振曲線に示されるように、特定の振動数範囲で生じており、この範囲では、明らかに浮上り振動が励起されている。浮上り振動の変形モードは剛支持の場合図-4に示すように側壁部はかなりの範囲にわたって浮上がるが、底板部は剛性が小さいため三日月状の部分だけが支持面から離れ、他の大部分は接したままの状態になっている。弾性支持では圧縮側の側壁下端が沈下するため引張側側壁の浮上り量は少ないが変形モードは同様であった。共振振動数は剛支持の場合の方が小さいが、これは浮上り量と浮上り範囲に対応した特定の振動系が形成されるためであり、加振加速度を大きくすると浮上り量も大きくなつて共振振動数の低下がみられた。

応答加速度と動液圧の関係は、図-5からちわかるように、支持条件の違いに拘りなく直線関係にあって、浮上り振動系の加速度増幅が動液圧の増大と密接な関係にあるようである。

また、浮上り振動時に基礎マウンドにもたらす側壁鉛直軸力については、図-6のように支持条件に応じてそれぞれ特定の関係が認められる。図中の計算値は動液圧に対して梁理論でタンク全体の曲げモーメントを求め、円筒の断面係数により軸力に換算したものであり、この計算値に対して、浮上り振動はかなり大きな軸力をもたらすことがわかる。

(3) 地震波加振の場合

応答加速度や動液圧の最大値の生起時刻は必ずしも地震波の最大加速度の時刻と一致せず、むしろ浮上り共振振動数の卓越する時間帯で生起していることがわかった。

4. あとがき

タンクの浮上り振動は、タンクおよび基礎マウンドの耐震設計において重要な要素となることがわかった。実設計用のアプローチとしては動液圧や側壁軸力が駆体の応答加速度と密接な関係にあるため応答加速度倍率の設定を図ることが考えられる。そのためには浮上り振動モードの固有振動数の予測がキーポイントになると考えられる。

参考文献：三村、永田ほか、同題、鹿島技研年報、Vol. 29, 1981

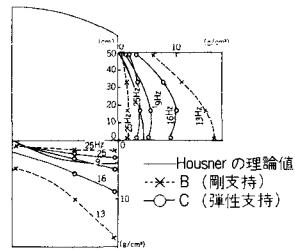


図-2 正弦波加振での動液圧
(100gal, 1/2全振幅)

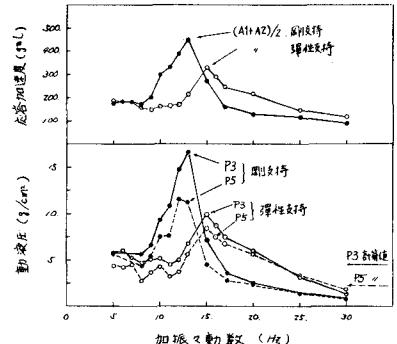


図-3 応答加速度と動液圧の共振曲線
(100gal加振, 1/2全振幅)

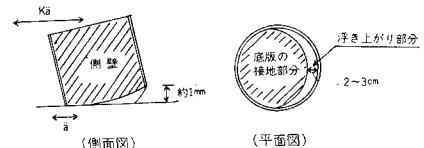


図-4 浮上り振動モード(剛支持, 100gal)

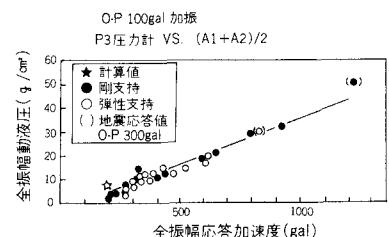


図-5 動液圧と応答加速度の関係

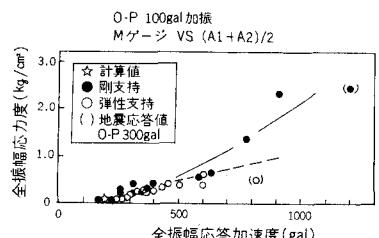


図-6 側壁鉛直軸力と応答加速度の関係