



## 表面波加振によるスロッシングに関する模型実験

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2013-11-19 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 宮脇, 幸治郎 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24729/00007942">https://doi.org/10.24729/00007942</a>

## 表面波加振によるスロッシングに関する模型実験

宮脇 幸治郎\*

## Experimental Studies on Slosh due to Surface Waves

Kojiro MIYAWAKI\*

## ABSTRACT

This paper dealt with sloshing tests of the liquid-storage tank on the soften model ground to act the steady sinusoidal surface SV-wave. We made the exciting machine by mechanical type with low frequency range.

The results are as follows.

- (1) The surface wave of a model ground along the exciting plate sets up the slip of the strike type.
- (2) The sloshing frequencies on the liquid-storage tank dominate the first mode and the zero and second mode are influenced of the rocking and sliding behaviors with a total tank system.
- (3) The sloshing mode with a floating roof is only the first and the surface wave height is restricted by the floating roof.

Key Words: Sloshing, SV-surface wave, Liquid-storage tank

## 1. はじめに

軟弱な地盤に設置されている地上式縦型円筒式タンクに表面波動的なSV波が作用した場合、タンク内の液体がどのような動的挙動を示すか、工学的に興味がある。すなわち、一般に液体貯蔵タンクには、水平なSH波が作用したときのスロッシング振動がよく議論され、その波高ならびに振動数について理論ならびに実験が、数多くなされてきている。しかし、実際の地震波特性は、その地震の発生機構によって大きく支配され、さらに震源からの距離等によっても変わってくる。したがって、震源、すなわち断面から比較的近距离でストライク型のスリップが生じた場合、ある対象とする地域にはSV波動的に比較的大きな波動が伝播してくる可能性もあり、しかも震源が浅い場合には表面波が卓越することになる。このような場合には、液体を貯蔵したタンク内でのスロッシング現象は、理論的・実験的に検討されていない。

本実験は、軟弱なモデル地盤を製作し、このモデル地盤に定常正弦波動的なSV波を起振機で加振させてやり、モデル地盤上に設けられた液体の貯蔵されたモデルタンクの動的挙動、特にスロッシング現象に注目して模型実

験した。なお本実験においては起振機の製作から実施し、比較的低振動数域の加振ができるものを製作した。さらに、モデル地盤の表面波動的なSV波が発生しているかどうかとも検討している。またタンクのスロッシングについては、浮屋根の有無についても調べ、興味ある現象が認められた。

## 2. 実験装置

## (1) 実験概要

本模型実験は、モデル地盤を加振する振動加振装置を製作する際、スロッシング振動数が一般に非常に低い領域にあるので、加振振動数帯域を0~6 Hzのものを製作した。また模型に対する全体系の相似律は、一般に一致させることは不可能であるため、スロッシング振動数の相似のみを考慮にいれて製作した(表1)。

実験は、製作された起振装置によりモデル地盤にどのような強制的な定常波が発生しているかを検討するもので、モデル地盤の表面における波動の平面的な伝播特性は、変位・速度・加速度あるいはひずみ等の物理量で計測できる。ここでは加速度およびひずみ量を用いて、伝播特性を調べてみた。

つぎに、地表面に設置されたモデルタンクのスロッシング特性について検討を加える場合、貯蔵された液体の

動揺は、その液深、加振振動数、浮屋根の有無によってその動特性が異なってくる。スロッシングのモード等の全体の動特性を把握するために、ビデオカメラによる撮影を行い、これをブラウン管に再生することによる計測も加えた。

加振方法は、手動の振動数掃引実験を行った。初期振動数を0.122 Hzに設定し、約 $\Delta f = 0.157$  Hz刻みに約6 Hzまで32段階で継続時間15 sec間ずつ増加させ、定常波加振を実施した。

(2) 起振装置

本実験における装置は、低振動数域の発生可能で製作しやすさから機械形式の加振装置を製作した。

図1は、装置機構の概要図であり、用いた起動モーターは回転数を連続的に可変することができるものであり、この回転軸にタイミングベルトを掛け、回転比を変化させた。回転数の変化した軸の端にクランクを取り付け、クランクシャフトを用いた。クランクの回転運動をスライドユニットにより並進運動に変化させる。さらに、加振部の変位を変化させるために2連のテコを設けた。一方のテコの先に加振部のシャフトを取り付けた。

本装置のモデル地盤への強制的に変位させる振幅は、2 mmに設定されている。また、加振振動数は0~6 Hzまで発生させることができる。

表1 相似律

	長さ $L_r$	時間 $T_r$	振動数 $f_r$	加速度 $\alpha_r$
相似比	$3 \times 10^{-3}$	$5.5 \times 10^{-3}$	18.25	1

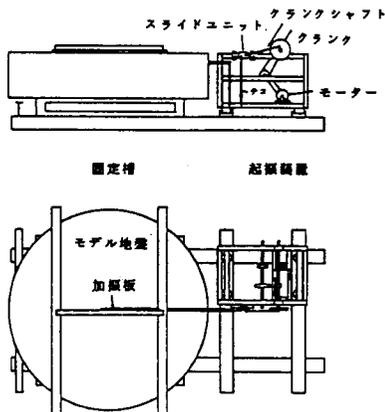


図1 実験装置

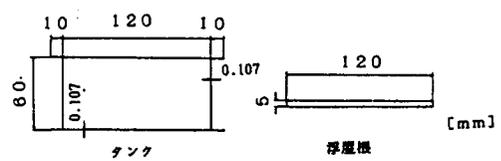


図2 タンク模型

(3) モデル地盤

実験に使用するモデル地盤は、幅100 cm×長さ200 cm×層厚30 cmの寸法のものである。材質は、厚さ10 mmのウレタンフォームであり、これを3枚重ねて表層部に厚さ1 mmの合成ゴムを接着して構成されている。

境界条件は、長さ方向に沿う両側は摩擦の大きい合板に接しており、幅方向に沿う両側は、自由境界になるように設置した。また、モデル地盤の下部面は乾燥した砂の上に設置した。これは、モデル地盤を設置するための固定槽の底面を容易に水平に設定でき、摩擦が大きいこともあるので採用したものである。

モデル地盤は、このような地盤の中央部のウレタンフォームに幅40 cm×厚さ0.5 cmの合板を鉛直に挿入し、合板の上下端をガイドによって固定し、合板が水平方向にスムーズに加振するように製作した。合板の振動がモデル地盤との摩擦によって波を発生させる機構になっている。発生する波は、板から両方向に伝播して自由端に達して反射するようになっている。

(3) モデルタンク

地上式液体貯蔵タンクは、非常にたわみ性の高い構造物であり、幾何学的相似比が大きいたと、実際にモデルタンクを製作しようとすると、必然的にひずみ模型とならざるを得ない。本実験では、半径/高さ=1となる形状のものに限定し、モデルタンクを製作した(図2参照)。

モデルタンクの材質はOHP用のフィルムを用い、高さ、半径を6 cm、側板、底板の板厚さは107 $\mu$ とする。

モデルタンクは、側板上端部のウインドガードに相当する剛性をもたせるために、上端部に板厚の2倍の円形リンクをつけ真円を保つようにしている。また浮き屋根は3 mm厚の発砲スチロールで、5 mm幅の円形リンクにして、フィルムに接着して製作した。

3 計測システム

(1) 計測機器

本実験に使用する計測用機器類には、つぎのようなものがある。

まずモデル地盤に、せん断波を発生させる位置での計測量は、変位量としてピックアップは差動トランスを用い、これを直流増幅器で増幅して、ミニライター（渡辺側器製、WTR751）あるいはデータレコーダー（TEAC、R210）に記録した。モデル地盤の表層部での加速度成分は、非接着型の小型加速度計（新興通信工業製、2L）を用いてピックアップし、ブリッジヘッド（三栄測器製）で起電圧並びに変動電圧を取り出し、これを動歪み計（新興通信製、6001F、三栄測器製、6M91）で増幅し、ミニライターあるいはデータレコーダに記録した。また表層付近での水平方向のひずみ量は、防水型ひずみゲージを貼り付け、同様に記録した。ピックアップの設置位置は、図3に示す。

モデルタンクのピックアップ量は、ビデオカメラ（ナショナル製、VW-SHM3）の撮影による変位量である。記録された映像は、VTRによりテレビ用のディスクプレーによって再生し、測定した。

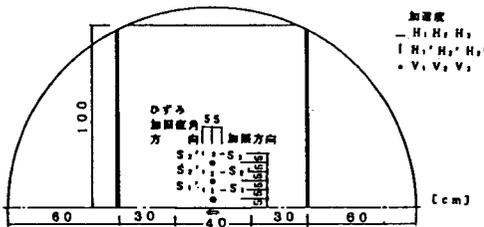


図3 センサー配置図

(2) データ処理

変位・加速度およびひずみのデータは、ミニライターあるいはデータレコーダーに時刻歴として記録した。ミニライターに記録されたデータから、その振幅を記録紙上で読み取り、キャリブレーションを用いて実際の物理量に換算した。また、ピーク値間の長さとして紙送り速度とにより周期を求め、さらに他の物理量の相互のピーク

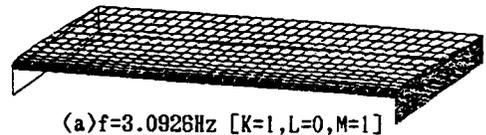
表2 モデル地盤の諸元

加振方向幅 a (cm)	100
伝播方向長 b (cm)	200
表層厚 c (cm)	30
単位体積重量 $\gamma$ (gr/cm <sup>3</sup> )	0.0151
ヤング率 E (gr/cm <sup>2</sup> )	260
ポアソン比 $\nu$	0.2
縦波速度 $V_p$ (cm/sec)	1369
横波速度 $V_s$ (cm/sec)	838

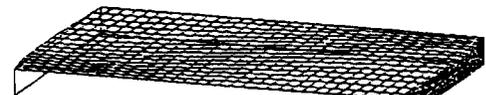
の時間差より位相差等を読みとった。

ビデオ記録は、VTRによりそのまま再生し、必要な画面においてストップモードにし、注目している点の座標を読み取る。あるいはパソコン（NEC、PC9801U2）に取り付けた画像処理用のボードにより同様の処理を機械的に読み取らせた。

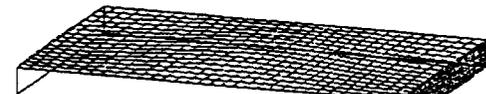
以上のように求められた物理量は、加振振動数と応答量との関係で表示し、動的特性を求めた。



(a)  $f=3.0926\text{Hz}$  [ $K=1, L=0, M=1$ ]



(b)  $f=3.1627\text{Hz}$  [ $K=1, L=1, M=1$ ]



(c)  $f=3.3645\text{Hz}$  [ $K=1, L=2, M=1$ ]

図4 モデル地盤モード

4 モデル地盤の基礎的特性

(1) 卓越振動数

本実験におけるモデル地盤の諸元は表2に示すような値をもっている。これらの諸元を用いて数値計算により、卓越振動数を求めてみる。

図4の(a)~(c)は、y方向のモードを0次、z方向のモードを1次にして、x方向のモードを1, 2, 3次に変化させたときのモード図である。表3は、本実験対象振動数域でのモード次数と卓越振動数との関係を示したものである。これより本実験ではy方向のモードが生じ易いようである。

(2) モデル地盤の加速度特性

本実験装置によって伝播する波動の表層部での、空間的な加速度特性を調べるため実験を行った。

まず、図5(a), (b)は、2.272 Hzにおけるせん断加振される部分の変位とその点から5 cm離れた位置での加振平行水平加速度の時刻歴応答結果を示す。図の結果より、せん断する板とせん断されるモデル地盤のウレタンフォームとの相対的なずれ特性が、加速度波形によく現れている。すなわち、せん断板が交替的に作用すると加速度

表3 モデル地盤の卓越振動数

モード数			振動数 f(Hz)
M	L	K	
1	0	1	3.093
1	1	1	3.163
1	2	1	3.364
1	3	1	3.676
1	4	1	4.073
1	5	1	4.532
1	6	1	5.036
1	7	1	5.574
1	8	1	6.136
2	0	1	6.860
1	0	2	6.970

表4 貯蔵液体によるスロッシング振動数

モード数		振動数 f(Hz)
M	N	
0	1	3.958
1	1	2.532
2	1	3.495
1	2	4.693
1	3	5.943
1	4	6.959

表5 モデルタンクのバルジング振動数

液深 (cm)		振動数 f(Hz)
Veletosos	H=0	28.055
	H=6	167.830
Hauroun	H=4	22.851
Ellaithy	H=6	15.293
	H=4	22.397
小川 坂井	H=4	22.397
	H=6	16.262

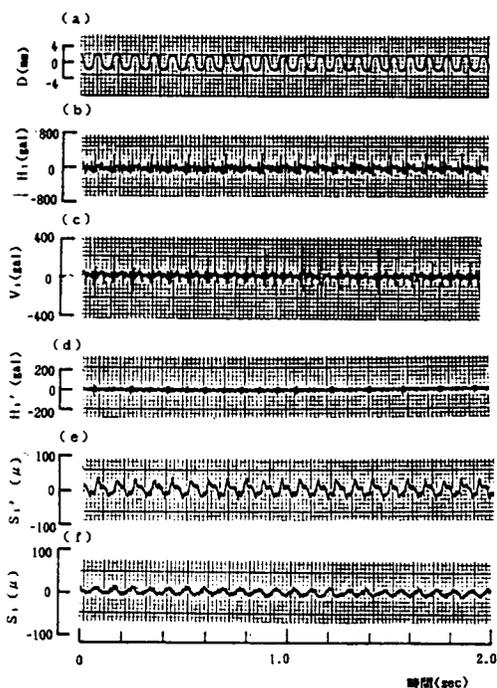


図5 時刻歴応答例

波形が、ショットノイズ的に現れている。

図6(a), (b)は、水平成分の加振方向に平行な方向に対する応答特性を示したものである。図(a)は変位一定入力に対する結果であり、図(b)は単位加速度あたりに対する結果である。縦軸に5, 15, 25cm それぞれ離れた加速度計の水平成分で加振方向平行時の応答をプロットしたも

のである。実験結果は、5, 15cm のそれぞれの位置での応答値がほぼ同じ傾向にある。加振振動数が2.273 Hz付近に大きな応答値をもっている。

同様に図5(c)は、2.272 Hzにおけるせん断部での変位を5cm離れた位置での鉛直方向の加速度の時刻歴応答結果を示す。

また、図6(c), (d)は、鉛直成分に対する応答特性を示したものである。図は、横軸に加振振動数を取り、縦軸にはせん断加振される位置から5, 15, 20cm離れた距離に設置された加速度計の鉛直成分の応答値をプロットしたものである。実験結果は、せん断位置から5, 15, 25cmの応答値がほぼ同じ傾向の応答を示している。すなわち、2.083, 2.747 Hzの振動数に、同じレベルのピークをもった応答となっている。

図5(d)は、2.272 Hzにおけるせん断部の変位より5cm離れた位置での加振直角水平方向の加速度の時刻歴応答結果を示す。

図6(e), (f)は、水平成分の加振方向に垂直な方向に対する応答特性を示したもので、縦軸にその応答値、横軸に加振振動数で表示している。実験結果は、ほとんど増加することもなくほぼ一定値を示しており、そのレベルは小さい。

(3) モデル地盤のひずみ特性

本実験装置によって伝播する波動の表層部での空間的なひずみ特性を調べるための実験を行った。

まず図5(f)は、加振部でのせん断変位を10cm離れた位置でのせん断方向のひずみ成分の時刻歴応答である。図の結果より、ひずみ波形はいくぶんショットノイズ的な部分も見られるが、せん断板の変位波形と似た正弦波的な波形が認められる。

図7(a)は、加振方向に直交する平行な成分に対する応

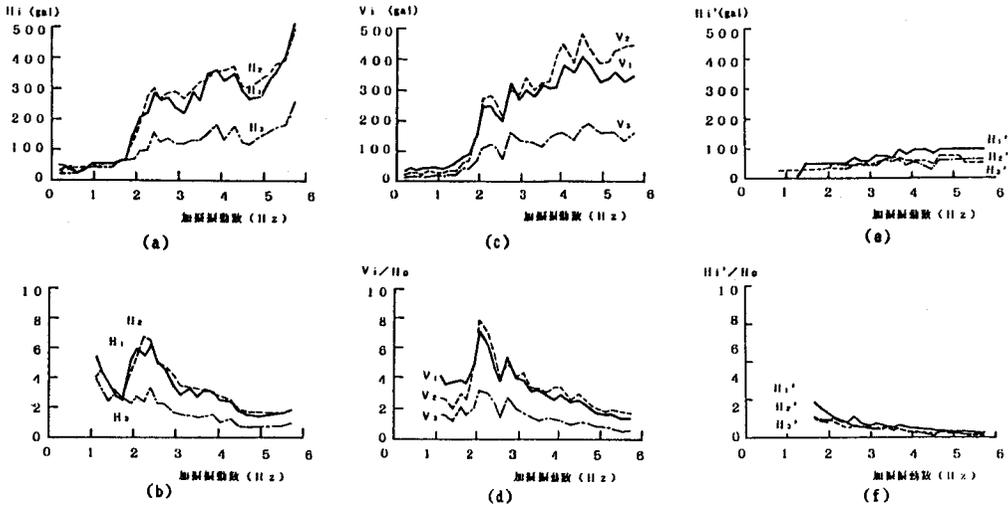


図6 加速度応答

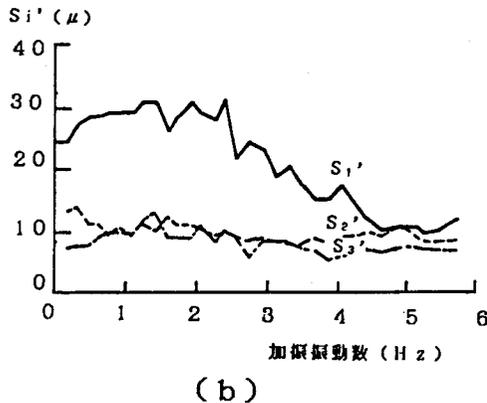
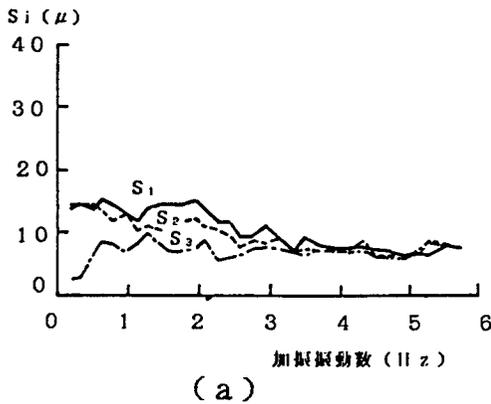


図7 ひずみ応答

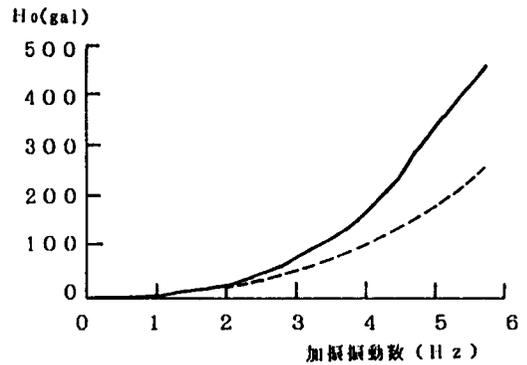


図8 加振特性

離れた位置に設定されたひずみゲージの平行成分の応答値をプロットしたものである。実験結果は、20、30cmの応答値をプロットしたものである。実験結果は、20、30cmの応答値は、加振振動数が増加してもほぼ一定であり、それぞれ同じ傾向の応答を示している。それに対して10cmの応答値は、2.272Hzまでは一定であり、それ以上の振動数では減少の傾向にある。そして、4.7Hzあたりからは、距離に関係なくそれぞれ同じ傾向の応答を示している。

図5(e)は、加振部でのせん断変位と10cm離れた位置での加振直角成分のひずみの時刻歴応答である。

図7(b)は、加振直角成分で、10、20、30m位置でのひずみを縦軸に、加振振動数を横軸にとった図である。実験結果は、加振部から距離に関係なく応答値がほぼ同じ傾向を示し、振動数の増加にともない同じように減少傾向を示す。

答特性を示したものである。図は、横軸に加振振動数をとり、縦軸にはせん断加振される位置から10、20、30cm

(4) 結果に対する考察

モデル地盤の卓越振動数は、鉛直成分に対して比較的よく現れている。すなわち、せん断波が水平に伝播する方向のモード次数が1～8次程度の固有振動数が現れる(表3参照)。

まず図8は、加振装置を用いて、モデル地盤をせん断加振する際、せん断部での加速度による値である。ここに実線は実測値であり、破線は振幅変位を2mmに設定したときの値である。なお実測値は設定振幅変位一定になっているが、本実験では加振入力に再現性があった。

鉛直成分の加速度に対する距離的な応答特性は、5, 15cmではほぼ同じ傾向を示しており、25cmでは、距離的な減衰が認められる。また、図6(a), (b)より、水平成分の加振方向加速度の特性は、1.8Hzまでは大きな違いがある。これより高い振動数では鉛直成分と同様な応答値に近い応答となっており、すこし距離減衰がある。

図6(e), (f)より加振直角方向加速度の特性は、5cmでの応答より15, 20cmでの応答が大きい。これよりも高い振動数では小さくなり距離減衰が認められない。

図7(a)より、20, 30cmでの応答は10cmでの応答に対して距離減衰があるが、5Hz付近まで振動数が増加とほとんど減衰が無くなる。この傾向は加速度の応答と逆の傾向となっている。

図7(b)より、対応するひずみ特性は、10, 20cmは同じようなひずみレベルで同じような振動数特性を示す。以上の伝播特性に距離減衰は、加振部からの距離が15～20cm付近において大きいことが分かる。そこで本実験でのモデルタンクの中心を加振板から15cmの位置に設置して実験した。

5. スロッシング振動数およびバルジング振動数

(1) 基本量の算定

剛体の円筒貯蔵槽内に液体がある場合、その液体が完全流体と仮定されるならば、そのスロッシング振動数は表4のように求められた。

Veletosos, Young<sup>1)</sup>らは、満水状態でタンクが曲げ変形すると仮定したときの1次の固有振動数を求めている。一方Haroun, Ellaithy<sup>2)</sup>は、タンク-液体系を等価な力学モデルに置換し、この系の固有振動数(バルジング)を求めている。同様のバルジング振動数に対して、小川・坂井<sup>3)</sup>は有限要素モデルより簡易式を与えている。これらの算定式より固有振動数は、表5に数値計算結果を示す。

(2) タンク内液のスロッシング特性

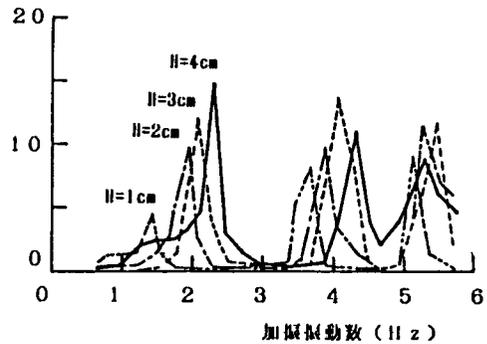


図9 スロッシング応答(屋根無し)

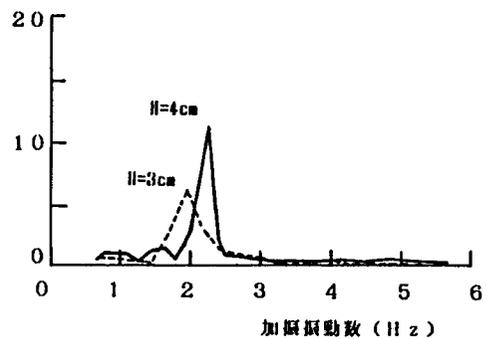


図10 スロッシング応答(屋根有り)

本実験によって得られたスロッシング特性は、図9から図10に示すようになった。

図9は、液深をパラメタにとったときの自由表面の最大波高を加振振動数との関係で示したものである。低振動数域に生じているピークは、いわゆる貯蔵液体の1次のスロッシング振動数であるが、4Hz以上に生じているピークは、貯蔵液体の中央部の波高が大きく動揺したときの波高であった。スロッシングのピークは、液深が1, 2, 3, 4cmと深くなるにしたがって波高が高くなり、ピーク振動数も高くなっているのがわかる。一方、中央部の波高が動揺する場合には、明確な振動数の移動はみとめられなく、その深液による応答レベルには変化がなく、非常に大きな値を呈している。

図10は、自由表面に浮屋根がある場合に対するスロッシング挙動を図示したものである。浮屋根が有る場合のスロッシング振動数は、無い場合のスロッシング振動数とはほぼ同じであるが、波高が屋根の無い場合より低くなっている。また、深屋根の無い場合には、4Hz以上にピークが幾つか認められるが、屋根が有る場合には、スロッシング特性以外の他のピークは認められない。タ

ンクの水深が5 cmの場合の浮屋根の有る場合と無い場合とを比較すると、スロッシング振動数は同じ所に発生しているが、波高が屋根の無い場合のほうが低くなるのがわかる。また、屋根の無い場合には、スロッシング特性の他に、4 Hz以上の振動数領域にピークが認められるが、浮屋根を設けるとそのピークを認められない。

### (3) 結果に対する考察

本実験によって得られたスロッシング特性と貯蔵液体のスロッシング振動数の表4とを比較すると、つぎのようになる。まず実験における水深4 cmでの1次のスロッシング振動数は、2.3 Hz付近にあるが、理論式の結果は、2.532 Hzである。このように少し低い振動数となっていた。また、実験の4 Hz以上のピークは、液体の中央部の波高が非常に大きく動揺しているため、0次あるいは2次の偶数次のスロッシングと考えられる。この場合、応答波高レベルがこのように大きい原因として考えられることは、タンクは地盤の上に固定されず、地盤上にそのままタンクを置いた状態になっており、この状態の上下動の卓越振動により揺れると、タンクの回転あるいは滑動モードのため図9のような大きなピークが起こると考えられる。滑動モードを考慮した液深4 cmの場合のスロッシング振動数は2.007 Hzとなっている。

つぎに図10の結果において示したように、タンクに浮屋根が有る場合と無い場合では、その特性に大きな差異が生じる。すなわち、スロッシングの1次の振動数付近での波高の動特性は、屋根の有無によらず、認められるが、これより高い振動数に生じる屋根無しの場合の動揺は、屋根有りの場合には生じない。そして、1次のスロッシングにおいてもその波高は、3/4程度に低下している。このような現象は、日本海中部地震等におけるタンクのスロッシング挙動とよく一致している<sup>4)</sup>。すなわち、ダブルデッキ型の浮屋根の場合はスロッシングのタンク被害は少なく、浮屋根による貯蔵液体の動揺を抑える効果が、実験的に確かめられたことになる。

浮屋根が有る場合の地震波入力を加振すると、みそ摺り運動が認められると述べられている。しかし本実験においては、このような現象は、現れなかった。その原因は、本実験が正弦波定常波加振であるためと考えられる。

## 6. まとめ

本研究は、表層地盤にS V波的な表面波を発生させ、これによって地上式の液体貯蔵タンクの動的挙動、特にスロッシング現象に注目して模型実験を実施した。実験

は、比較的低振動数域の加振が、必要となるため、電氣的・油圧的方式による起振機であると制御しにくいので、機械的方式のものを採用した。この起振機によりモデル地盤を加振し、S V波的な定常正弦波を発生させ、実験を行い、いくつかの結果を得た。これに関連してまとめるとつぎのようになる。

(1) 製作した起振装置は、機械的方式のものであるため、その発生できる振動数は、0~6 Hzの領域であり、加振振幅は2 mm~4 mmになっているが、テコの比率により1~20 mmまで可変である。

(2) モデル地盤に発生した波動は、せん断される板付近での加速度波形でみると、ストライク型のスリップが生じている。なお、本実験においては、鉛直動がせん断方向水平動より卓越した波動となっている。さらに、表層付近のひずみ波形で見ると、加振されるせん断変位の波形は比較的相似な正弦波の波形となって現れている。

(3) つぎに、モデル地盤での波形の振動数特性は、その明瞭な卓越振動数が加振平行水平動、鉛直動に対しては、2.3 Hz付近にピーク値が現れている。これは、モード解析によるせん断波が進行する方向のモードの振動数が卓越振動数として現れている。

(4) 貯蔵液体のスロッシング振動は、1次のモードが最初に現れて、液深に比例してその波高は大きくなるが、0次および2次以上のモードに対しては、液深との相関はあまり認められなかった。これは、タンク全体の回転、滑動等の挙動ならびに表層地盤の上下の卓越振動による影響が大きいと考えられる。

(5) 浮屋根の有る場合には、スロッシングの1次のモードにおける振動数において大きく動揺するが、0次あるいは2次以上のモードではスロッシングは現れなかった。すなわち、浮屋根による自由液面の動揺は抑えられ、1次モードのみ現れ、その波高の大きさも3/4程度になっている。

(6) ランダム地震動の場合には、浮屋根のみそ摺り運動が生じるといわれているが、本実験は、正弦波加振のS V波であるので、このような現象は現れなかった。

以上のような項目がまとめとなる。

このような比較的簡単な装置により、大型石油タンク等の動的挙動に関して模型実験を行うことができ、ある程度特性が得られた。

これらの結果を通じて検討すべき課題には次のような項目がある。

(1) 起振機で、自作によってスライドユニットや2連のテコを製作したが、本装置では剛性が足りず改良しなければならない。

(2) モデル地盤に加振振動数を与えるために合板を用

いたが、合板が水平方向にスムーズに加振せずに、斜め方向に加振しているため鉛直成分が大きくなるので改良する必要がある。

(3) 本実験では加振振動数は一定にして行ったが、振幅を変位させて検討する必要がある。

(4) 本実験のモデルタンクは、一定の場所に設置したが、今後タンクを移動して、また2基以上のタンクを置いて検討する必要がある。

(5) 本実験では伝播する波形の表層部での空間的な特性を調べたが、今後地盤動の鉛直方向の波動の分析特性も調べる必要がある。

最後に実験の際には多くの協力を頂いた本校技師吉田義隆、および本校卒業生角谷充正君、岩井宗一君、田中昌広君に深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) A.S.Veletosos, J.Y.Young: "Dyamic of fixed-base liquid-strage tanks", U.S. Japan Seminer for Earthquake Engineering Research with Emphasis on Life-line Systems, 1976, pp.12-13.
- 2) M.A.Haroun, Hamdy M.Ellaithy: "Modal for flexible tanks under going rocking" ASCE Vol. EM111, No 2, pp.144-151.
- 3) 小川浩, 坂井藤一: "円筒形液体タンク地震荷重の近似計算式について", 第38回年次講演概要集 I, 1983, pp.557-558.
- 4) 清水作造, 小山靖: "ダブルデッキ型浮屋根を有する石油タンクのスロッシングについて", 第7回地震工学シンポジウム, 1986,ppp. 1885-1889.