

# 地震時における円筒貯槽の横ずれ現象の解析 第1報

—小型円筒貯槽模型による実験結果—

On the Analysis of Sliding Phenomenon of a Cylindrical Liquid Storage during a Earthquake—I

—Experimental Results by a Small Scale Cylindrical Liquid Stogage Model—

曾我部 潔\*

Kiyoshi SOGABE

## 1. はしがき

地震時に円筒タンクがロッキングや横ずれを生じた例が報告されている。<sup>1)</sup>しかし、これらの現象がどうい  
うメカニズムでいかなる条件のもとで発生するのかは  
ほとんど解明されていない。

円筒タンクの横ずれは、他の機器類が横ずれを生じ  
ない場合にも発生しているから、円筒タンク特有の現  
象であり、内部の液体のスロッシングが何等かの影響  
を与えているものと考えられる。また、この現象は比  
較的加速度の小さな地震の際にも発生しており、水平  
震動のみが原因となって発生する現象とは考え難く、  
上下震動も何等かの影響を与えているものと考えられ  
る。

本報では、上の推論に基づき、小型の円筒貯槽模型  
およびこれと相似な形状の剛体ブロックを水平方向と  
上下方向の振動を同時に行う振動台上に設置し、水平  
方向に地震波で、上下方向に正弦波で加振し、横ずれ  
現象が、剛体ブロックよりも円筒貯槽模型に顕著に現  
われることを確認し、この現象が発生するメカニズム  
および条件を解明するために行った実験について示す。

## 2. 実験装置および実験方法

### 2.1 実験装置の概要

水平方向の振動をする大型の振動台上に上下方向の  
振動をする小型の振動台を固定する。上下方向の振動  
台上にベニヤ板あるいはトタン板を取り付け、その上  
にトタン製の小型円筒貯槽模型あるいは木材製の剛体  
ブロックを固定することなく設置する。このベニヤ板  
とトタン板は振動台と貯槽模型あるいは剛体ブロック  
との間の摩擦係数を変化させるために交換して用いた。  
模型のロッキングおよび横ずれを測定するために2台  
の高速度カメラを水平方向の振動台上に鉄棒で固定し  
た。

これらの各部分について簡単に示すと次の通りであ  
る。

\*現在上智大学理工学部機械工学科 講師

### 1) 円筒貯槽模型

大型の円錐天井式の円筒タンクの約1/100の円筒貯  
槽模型である。この模型の形状および寸法を図1に示  
す。この模型は容器の変形をも測定する目的でできる  
だけ薄い規格の板厚0.27mmのトタン板を用いて製作  
した。

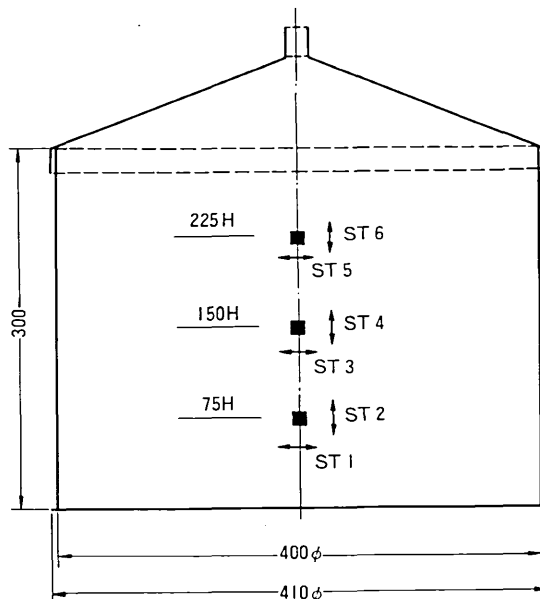


図1 模型容器の形状と寸法およびストレインゲージの位置

### 2) 木材製の剛体ブロック

内部に液体の無い剛体ブロックであり、液体貯槽模  
型との横ずれを始める限界および横ずれ状態の差異を  
調べるために用いた。直径は100mmであり、高さは25  
mmと50mmのものを2種類用意した。

### 3) 水平方向振動台

東京大学生産技術研究所千葉実験所に設置されたも  
のであり下記の性能を有する。

形 式 電気・油圧サーボ方式

制御方式 加速度制御方式/変位制御方式

## 研究速報

加振性能 最大振幅  $\pm 75\text{mm}$  (台無負荷時)  
 最大加速度  $1,500\text{gal}$  (台無負荷時)  
 最大振動数  $30\text{Hz}$  (正弦波)  
 最大加振力  $4.7\text{ton}\cdot\text{G}$  (動的)

## 4) 上下方向振動台

形式 松平式振動試験機 (UB-200)  
 制動方式 アンバランスマス方式  
 加振性能 最大振幅  $\pm 10\text{mm}$   
 最大振動数  $3,300\text{rpm}$   
 最大搭載量  $20\text{kg}$

## 2.2 測定項目および測定方法

つきに示す各項目について測定を行った。

## 1) 模型容器の横ずれ量

上下方向の振動台の上に取り付けたベニヤ板あるいはトタン板に、模型の直径と同じ大きさの円と目盛りを描いておき、この上に模型を、下面の端が丁度この円に一致するように設置しておく。模型の一方の端の真上に取り付けられた高速度カメラで模型の下端と上述の円とのずれを撮影し、フィルムアナライザを用いてずれの量を求めた。

## 2) 模型容器のロッキング

上下方向の振動台の端に固定された高速度カメラを用いて、水平方向の振動に垂直な方向から模型容器のロッキングの状態を撮影した。

## 3) 模型容器のひずみ

模型容器の軸方向および円周方向のひずみをストレインゲージおよびストレインメータを用いて測定した。ストレインゲージの位置を図1にST1～ST6で示す。

## 4) 水平方向振動台の加速度および変位

振動台の制御装置に取り付けてあるモニタ端子よりモニタした。

## 5) 上下方向振動台の加速度および変位

上下方向振動台の加速度は小型の抵抗線型加速度計(新興通信製, BA型,  $\pm 2\text{G}$ )を上下方向振動台に取り付け、ストレインメータを用いて測定した。また変位は振動台の変位量を振動計ダイヤルゲージを用いて測定した。

上記の3), 4), 5)について測定した結果をペンレコーダを用いて記録した。

## 2.3 実験の方法

円筒貯槽模型を、内部に規定の深さの水を入れ、上下振動台に取り付けてあるベニヤ板あるいはトタン板の上の規定の位置に設置する。

つきに上下方向振動台を規定の加速度の正弦波(振動数  $25\text{Hz}$ )で加振し、さらに水平方向の振動台に規定の加速度の地震波を入力して加振し、2.2に示した各項目についての測定を行った。

実験に際して変化させたパラメータはつぎの4種類である。

## 1) 模型容器と振動台の間の静摩擦係数

上下方向の振動台に取り付ける板をベニヤ板とトタン板の2種類で変化させ静摩擦係数を変化させた。

## 2) 模型容器内部の水の深さ

模型容器内部の水の深さを直径の25%, 50%の2段階で変化させた。

## 3) 上下振動の加速度

上下方向の振動台は振動数  $25\text{Hz}$  の正弦波で加振した。加速度の大きさは0から  $100\text{gal}$  ずつ変化させ、上下振動だけで模型が自然にずれ始めるまで増加させた。

## 4) 水平振動の入力波および加速度

水平方向の振動台にはEl Centro波(1940, NS)を入力波として用い加振した。データレコーダの送り速度をつぎの2段階で変化させた。

## i) 実時間

## ii) 実時間に対して2倍の速度

最大加速度はi)の場合には  $71.5\text{gal}$ ,  $143\text{gal}$ ,  $214\text{gal}$ ,  $250\text{gal}$  の4段階で、ii)の場合には  $143\text{gal}$ ,  $286\text{gal}$ ,  $428\text{gal}$ ,  $500\text{gal}$  の4段階で変化させた。

なお上記の実験を行うに先立って、水平方向の振動台は静止させたままで、上下方向の振動台のみを加振し、模型を水平方向にばねばかりで引張ってずれ始めの荷重を測定し、上下方向の加速度に対する静摩擦係数を求めた。

## 3. 実験結果

実験の条件を前節に示したように変化させて実験を行なった。得られた結果をつぎに示す。着目すべきものはつぎの諸点である。

○ 模型とベニヤ板およびトタン板との間の静摩擦係数

○ 模型の横ずれの状態

○ 模型のロッキングおよび横ずれ現象の発生領域

なお以下の説明では、水深および木材ブロックの高さを表わすパラメータとして次式で定義される  $h$  を用いる。

$$h = \frac{H}{D} = \frac{\text{水深あるいはブロックの高さ}}{\text{直径}}$$

## 3.1 静摩擦係数

本実験では上下振動の影響は上下方向振動台と模型の底面との間の摩擦係数の減少のみにより考慮する。

ベニヤ板およびトタン板と貯槽模型との間の静摩擦係数を測定した結果を図2に示す。この図より、上下振動の加速度  $a_v$  に対する静摩擦係数  $\mu$  の値は、上下振動の加速度  $a_v$  の増加と共にほぼ線形に減少することが分る。

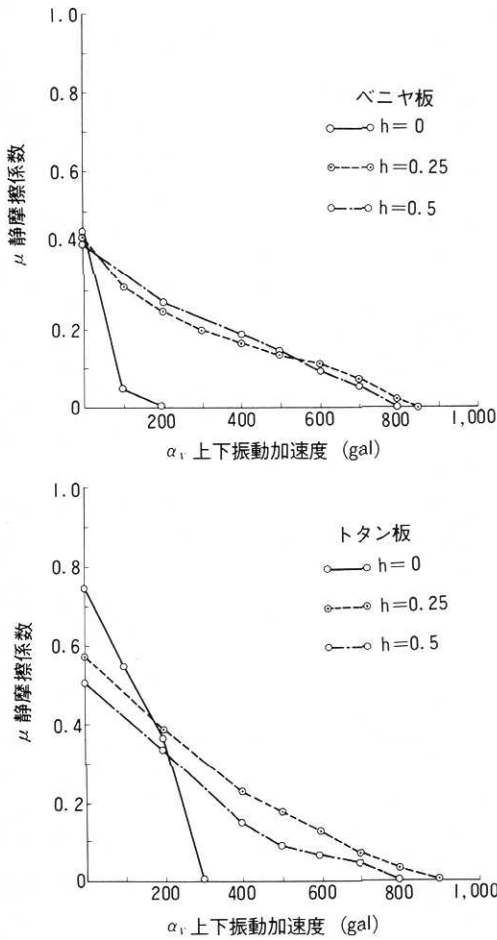


図2 静摩擦係数の測定結果

また水が入っていない場合すなわち  $h=0$  の場合には、静摩擦係数の値は他に比較して小さくなっているが、貯槽に水が入った  $h=0.25$  および  $h=0.5$  の場合には、両者はほぼ同一の値であるとみなすことができる。

### 3.2 模型容器の横ずれの状態

実験の結果上下振動の加速度と水平振動の加速度をある値以上にして加振すると貯槽模型の横ずれが発生することが判明した。横ずれ現象に対する記録の1例を図3に示す。

これはベニヤ板の上に置かれた  $h=0.25$  の貯槽模型を上下方向に750galの正弦波で加振し、水平方向に最大加速度250galのEl Centro波を実時間で入力した場合の振動台の動きと貯槽模型の横ずれ量および容器のひずみを記録したものである。

図3より、貯槽模型の横ずれが始まる時間は水平方向の振動台の加速度の最大値が表われる時間よりもかなり遅れており、なおかつ貯槽模型の横ずれ量は、貯槽模型内部の液体のスロッシングの固有周期とほぼ等しい周期で階段状に増加していることが分る。

このことから、貯槽模型の横ずれには、振動台の加速度による慣性力よりもむしろ内部の液体のスロッシングによる水平力が大きな影響を与えることが分る。

### 3.3 ロッキングおよび横ずれ現象の発生領域

実験の条件を前節の3)に示したように変化させ、各条件に対する貯槽模型のロッキング現象および横ずれ現象の有無を調べた。この結果を図4に示す。

図中⊗印はロッキング現象も横ずれ現象も発生しなかったことを示しており、⊙印はロッキング現象は発生したが横ずれ現象は発生しなかったことを示している。さらに○印はロッキング現象および横ずれ現象が

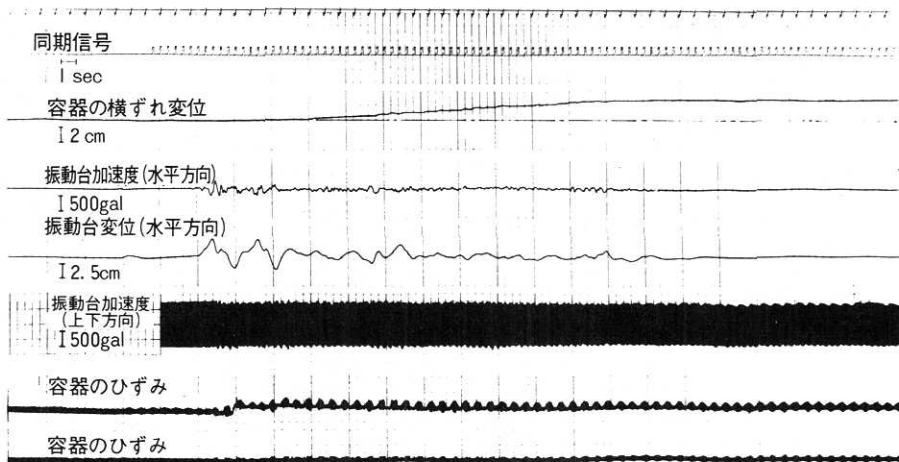


図3 貯槽模型の横ずれ量の測定例

研究速報  
 共に発生したことを示している。また図中の点線は、上下振動のみにより模型が自然にずれ始めた場合の上下振動の加速度の値を示している。この値は実験を行なった時の湿度等の条件に大きく左右されることが分った。

図4より次のことが判明した。

1) 水平振動を実時間で入力した場合

i) 貯槽模型の方が剛体ブロックに比較して相当低い加速度の値で横ずれを始める (a), (b)の比較)。

ii) 貯槽模型が横ずれを始める限界に対しては、上下振動と水平振動の加速度の間にはほぼ線形の関係がある。

iii)  $h=0.25$ の場合が $h=0.5$ の場合よりも低い加速度で横ずれを始める (b), (c)の比較)。

2) 水平振動を実時間の2倍の速度で入力した場合

i) 貯槽模型と剛体ブロックはほぼ同じ条件で横ずれを始める。この場合にはある程度以上の水平方向の加速度が必要である。

ii)  $h=0.25$ の方が $h=0.5$ の場合よりも低い加速度で横ずれを始める (g), (h)の比較)。

またトタン板を用いた場合の方がベニヤ板を用いた場合より横ずれを始める加速度の値が大きいくことが分る。

これらの結果を説明するために、各実験条件における貯槽内部の液体の液面動揺の応答に対する解析を行った (本報第2報を参照)。この結果、同一水平方向加速度入力に対して液体のスロッシングにより生じる最大水平力係数の大きさは次の順になることが分った。

- 1) 実時間で入力  $h=0.5$
- 2) 実時間で入力  $h=0.25$
- 3) 実時間の2倍の速度で入力  $h=0.25$

4) 実時間の2倍の速度で入力  $h=0.5$

さらにこの解析結果を用いて貯槽模型の横ずれ発生限界を求めた。この結果は図4に実線で記入してある。

上の結果と実験結果を比較すると、最大水平力係数が大きい程小さな加速度の値で横ずれが発生していることが分る。このことは、液体貯槽の横ずれには水平方向の加速度による慣性力よりも液体のスロッシングによる水平力が大きな影響を及ぼすことを裏付けていると考えることができる。

4. ま と め

小型円筒貯槽模型を上下および水平方向の振動で同時に加振する実験を行い、貯槽模型が実際にロッキング現象および横ずれ現象を呈することを確認し、これらの現象の発生する限界を求めた。

この結果、貯槽模型の横ずれには、振動台の加速度による慣性力よりも内部の液体のスロッシングによる水平力が大きな影響を与えることが分った。

また貯槽内部の液体のスロッシングの応答が小さい場合には剛体と類似の挙動を示す。この場合には横ずれは水平方向の加速度により生じるが、比較的大きな加速度が必要であることが分った。

最後に御指導いただいた2部柴田碧教授および実験で御世話になった柴田研究室の皆様へ深く感謝申し上げます。

(1975年9月22日受理)

参 考 文 献

- 1) 柴田碧：産業施設の被害，機械学会誌，Vol.75，No. 643，(昭47. 8 )，P13

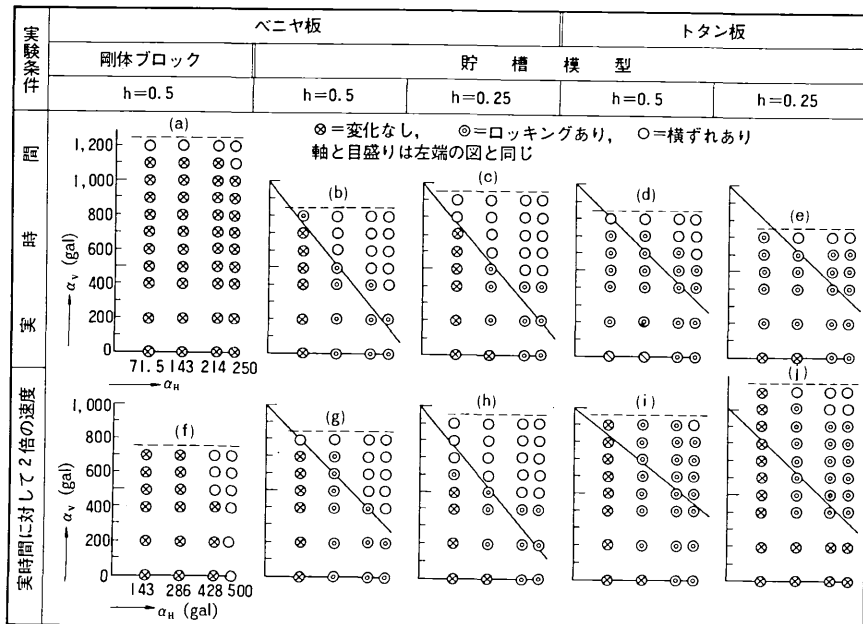


図4 ロッキングおよび横ずれ現象の発生領域 (水平方向入力：El Centro波)