

## 開放型危険物タンク耐震化の一方策について (第2報)

伏見 英\*  
川田 孝\*

### 1. ま え が き

強、烈震時における危険物タンクの液体表面の動揺防止に関しては、すでに幾種かの有効な装置が開発されているが、液面を曝露した開放型タンク(東京消防庁危険物審査基準によれば、洗浄槽、攪拌槽、熱処理槽、メッキ前処理槽その他これらに類するもので、タンク又は容器の液表面上の全部又は一部が開放されているもの)に適用することは、作業上、使用上の点からできない。

一般に、貯槽とか容器内の液体表面は、一定の周期特性をもった外力によって大動揺する性質がある。地震動の卓越周期と貯槽の固有周期が一致して共振現象を呈した場合、石油系、酸のタンク外への噴出、溢流が考えられ、溢流した液体は、化学的処理をすとか、回収する必要がある。火気を使用する工場などでは火災危険の点からも問題がある。

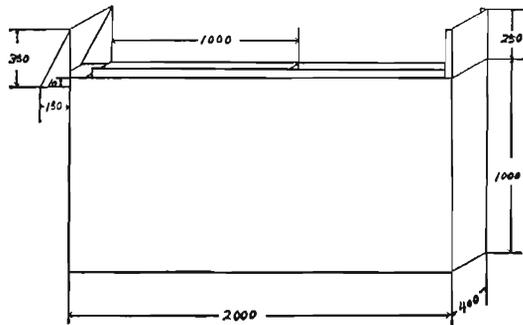
そこで、開放型タンクをハード面から検討して、地震動による液体溢流防止の一方策として、溢流防止装置を付設した矩形タンクを試作し、装置の効果に関する強制振動実験を実施したので、実験結果等について報告する。

### 2. 実 験 項 目

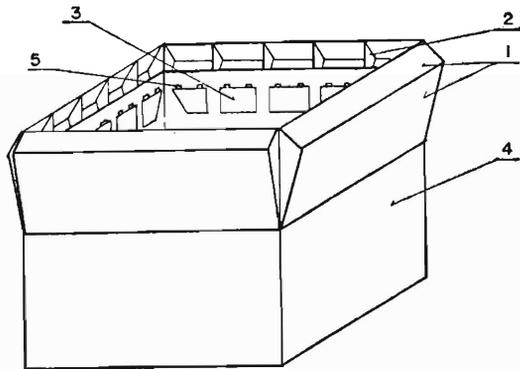
- (1) 水槽水の最大上昇水位
- (2) 溢流防止装置の耐震効果

### 3. 供試実験体の諸元

- (1) 鋼板矩形タンク(第1図)
  - 長辺: 2mおよび1m
  - 短辺: 0.2m
  - 高さ: 1.4m (3.2')
- (2) 塩ビ製溢流防止装置付矩形タンク(第2図)
  - 長辺: 1m



第1図 鋼板矩形タンク



第2図 溢流防止装置付タンク斜視図

短辺: 1m  
高さ: 0.9m (タンク本体側壁)

### 4. 実 験 概 略

Sloshing 時の最大上昇水位に関して、鋼板矩形タンク ( $l=1$ . および  $l=0.5$ ,  $l'=0.2$ ,  $h=1.4m$ ) の静水位を  $0.4-0.76m$  とし、各々の静水位における1次共振時の最大上昇水位を測定した。

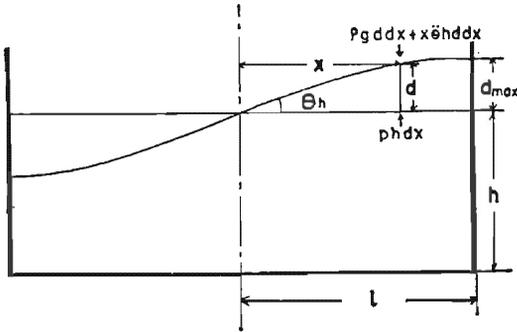
また、溢流防止装置を付設した塩ビ製矩形タンク ( $l=l'=0.5$ ,  $h=0.9m$ ) の最大静水位を  $0.76m$  としたときの、1次共振時の最大上昇水位、および液体の還

\* 第二研究室

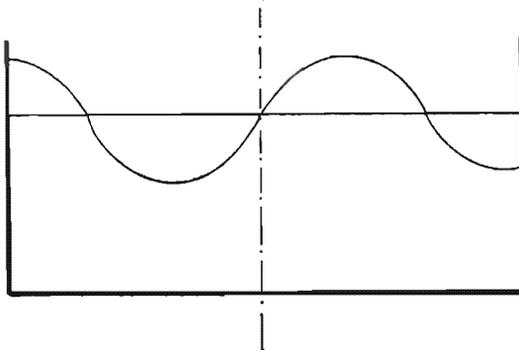
流状態を観測した。

### 5. 最大上昇液位の理論

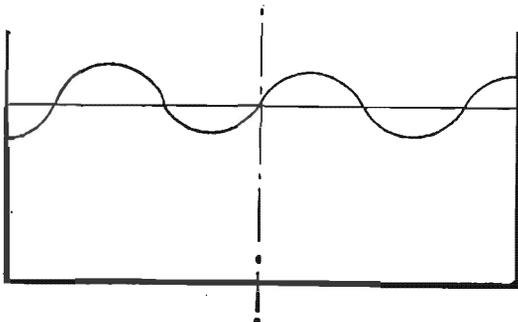
矩形タンク（長さ  $2l$ ，静水位  $h$ ）に正弦波振動を励起させると，理想的には第3図—第5図に示す応答波形を得るが，これらのうち，最大のは第3図の1次振動の液面である。したがって，実験的には，長さ  $l$ ，高さ  $h$  の1次共振周期を求めて強制振動実験を行えば，最大上昇水位を測定できるが，矩形タンク（長辺： $2l$ ）の増分（Scale up）に関する実験規模におのずから限界がある。ここでは，Housner 理論



第3図 1次振動の液面



第4図 2次振動の液面



第5図 3次振動の液面

と実験値に関して比較検討を行った。

Housner によれば，第3図を参照して，Newton の法則から(1)式が成り立つ。

$$Pdx - Pgd dx = x\dot{\theta}h ddx \dots\dots\dots (1)$$

ここで， $P, \theta$ を簡単のため，

$$P = -\rho \frac{l^3}{2} \left[ \left( \frac{x}{l} \right) - \frac{1}{3} \left( \frac{x}{l} \right)^3 \right] \frac{\partial \dot{\theta}}{\partial y} \dots\dots\dots (2)$$

$$\theta = \theta h \frac{\sin h \sqrt{\frac{5}{2}}}{\sin h \sqrt{\frac{5}{2}}} \sin \omega t \dots\dots\dots (3)$$

で与えられるものとすれば，

$$\frac{\partial \dot{\theta}}{\partial y} = -\sqrt{\frac{5}{2}} \frac{w^2 \theta h}{l} \frac{\cos h \sqrt{\frac{5}{2}} \frac{y}{l}}{\sin h \sqrt{\frac{5}{2}} \frac{h}{l}} \sin \omega t \dots\dots\dots (4)$$

(4)式を(2)式に代入して， $y=h$ とすれば，

$$Ph = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{5}{2}} \rho l^2 w^2 \theta h \left[ \left( \frac{x}{l} \right) - \frac{1}{3} \left( \frac{x}{l} \right)^3 \right] \cdot \coth \sqrt{\frac{5}{2}} \frac{h}{l} \sin \omega t \dots\dots\dots (5)$$

(5)式を(式)に代入して

$$d = \frac{1}{\rho(g - x\theta h w^2 \sin \omega t)} \left\{ \frac{1}{2} \sqrt{\frac{5}{2}} \rho l^2 w^2 \theta h \cdot \left[ \left( \frac{x}{l} \right) - \frac{1}{3} \left( \frac{x}{l} \right)^3 \right] \cdot \coth \sqrt{\frac{5}{2}} \frac{h}{l} \sin \omega t \right\} \dots\dots\dots (6)$$

を得る。故に  $d_{max}$  は

$$d_{max} = \frac{1}{\rho(g - l w^2 \theta h)} \left( \frac{1}{3} \sqrt{\frac{5}{2}} \rho l^2 w^2 \theta h \coth \sqrt{\frac{5}{2}} \frac{h}{l} \right) \dots\dots\dots (7)$$

ここで次振動モードに対して，

$$h/l \leq 1.5 \text{ のとき, } d_{max} = \frac{0.527l}{\frac{g}{l w^2 \theta h} - 1} \coth 1.58 \frac{h}{l} \dots\dots\dots (8)$$

$$h/l > 1.5 \text{ のとき, } d_{max} = \frac{Q}{\frac{g}{l w^2 \theta h} - 1} \dots\dots\dots (9)$$

また高次振動モードに対して，近似的に

$$d_{max} = \theta h l = \sqrt{\frac{5}{2}} A_1 \tanh \sqrt{\frac{5}{2}} \frac{h}{l} \dots\dots\dots (10)$$

(8)，(9)式は  $l w^2 \theta h \rightarrow g$  では成立しにくい。

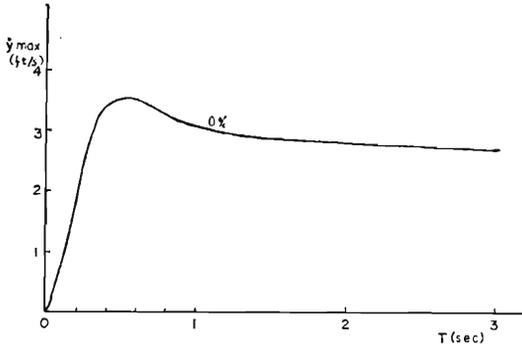
ここで，

$$Q = \frac{0.833l}{\frac{g}{l \theta h}} A_1 \dots\dots\dots (11)$$

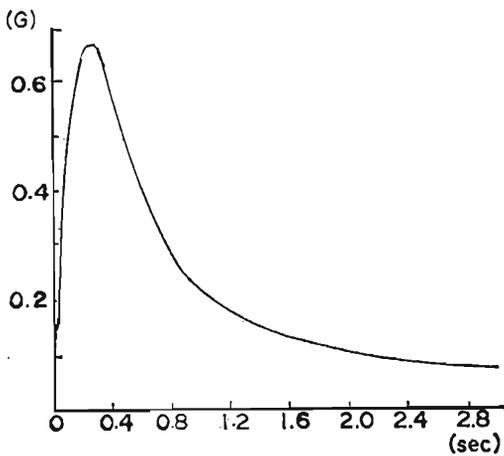
$$\theta h = 1.58 \frac{A_1}{l} \tanh 1.58 \frac{h}{l} \dots\dots\dots (12)$$

$$w^2 = \frac{1.58}{l} g \tanh 1.58 \frac{h}{l} \dots\dots\dots (13)$$

$$A_1 = \frac{\dot{y}}{w} \dots\dots\dots (14)$$



第6図 平均速度レスポンス曲線



第7図 平均加速度レスポンス曲線

$A_1$ : 流体面の最大振幅 (m)

$\theta_h$ : 流体面の最大変位角 (-)

$\omega_R$ : 矩形タンク液体の固有円振動数 ( $\frac{1}{\text{sec}}$ )

$g$ : 9.8 m/sec<sup>2</sup>

$\dot{y}$ : 平均速度応答スペクトル (第6図)

第6図に示す  $\dot{y}-T$  曲線は、Housner による平均速度応答スペクトル曲線と呼ばれているが、一質点系構造物の周期別レスポンス曲線とした方が理解しやすい。これは、1940年、El Centro 地震を含めた5つの強震記録を用いて、その平均値を縦軸にプロットしたものである。なお、参考のため、加速度レスポンス曲線を第7図に示す。(計算式省略)

なお、円筒形タンクに関しては、1次振動モードに対して、

$$h/l \leq 1.5 \text{ のとき, } d_{max} = \frac{0.408 R}{\frac{g}{R\omega^2 \theta h} - 1} \coth 1.84 \frac{h}{R} \quad \dots (15)$$

$$\frac{h}{l} > 1.5 \text{ のとき, } d_{max} = \frac{Q}{\frac{g}{R\omega^2 \theta h} - 1} \quad \dots (16)$$

$$Q = \frac{0.626 R}{\frac{R\theta h}{A_1}} \quad \dots (17)$$

$$\omega^2 = \frac{1.84}{R} g \tanh 1.84 \frac{h}{R} \quad \dots (18)$$

高次振動モードに対して

$$d_{max} = \theta h R = \frac{5}{6} \sqrt{\frac{27}{8}} A_1 \tanh \sqrt{\frac{27}{8}} \frac{h}{R} \quad \dots (19)$$

矩形タンクと同様に、 $R\theta h \omega^2 \rightarrow g$  では (15)、(16) 式は成立しにくい。

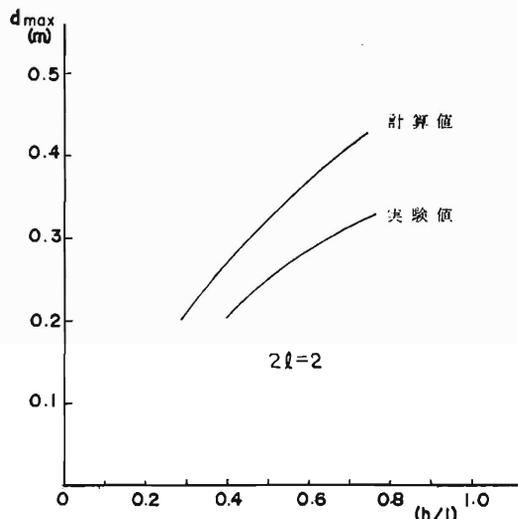
## 6. 実験結果および考察

地震動による石油貯槽又は危険物容器内液体の応答に関しては、加速度型応答、変位型応答、両者の複合型応答が考えられる。

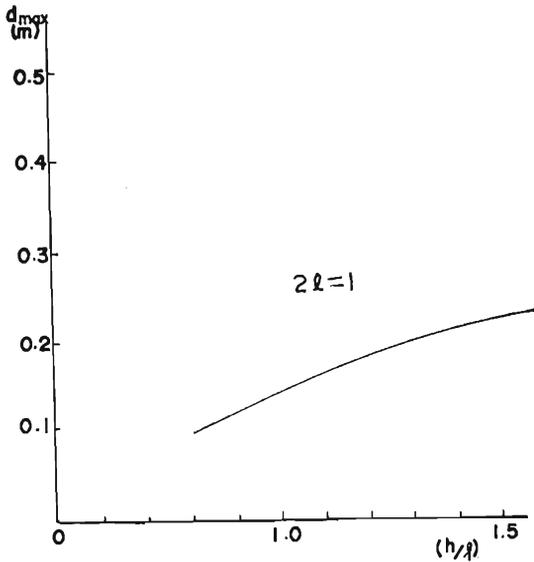
スロッシング現象を誘発する地動変位が、いわゆるやや長周期成分の卓越した水平単弦定常波で近似される波形であり、このことから正弦波を入力として与えて、自由液面の応答を実験的に検討することが認められている。

一般的に、液体貯槽の応答は、地動周期に対して選択性が強く、例えば、長辺を  $2l = 2 \text{ m}$ 、 $2l = 1 \text{ m}$  としたときの二つの矩形貯槽 (静水位 0.76 m) の1次共振周期は、1.7秒、1.1秒であるが、1.7秒の周期で強制振動を行なっても、長辺を  $2l = 1 \text{ m}$  とした矩形貯槽の液体の応答は微小である。

第8図—第9図に矩形貯槽の長辺を  $2l = 2$ 、 $2l = 1 \text{ m}$ 、静水位 (0.4—0.76 m) をパラメータとしたときの最大上昇水位 ( $d_{max}$ ) を示した。第8図は静水位の増加によって応答値が増し、その最大値は、実験



第8図 長辺2m時の最大上昇水位



第9図 長辺1m時の最大昇水位

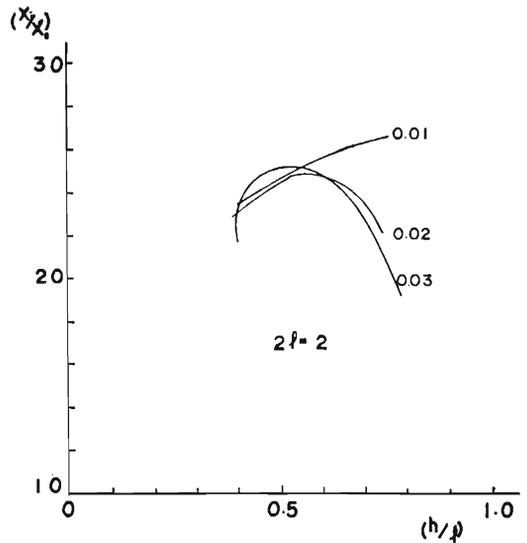
値で33cmであることを示しているが、Housner式によって導かれる計算値は実験値より大きい値が算出された。第8図と第9図を比較すると、第8図の実験値は、第9図の実験値より常に大きいことから、長辺の増大にしたがって応答波高の絶対値は増加するものと考えられる。また、第9図にはHousner式の計算値が図示されていないが、これは(8)式において、 $l\omega^2\theta_h$ の値が重力加速度 $g$ に近いことから $d_{max}$ の値が算出されない。

次に第10図—第11図に第8図—第9図を無次元化して定量的に示した。ここで、曲線右側の数字は水平震度( $\alpha/g$ )の値である。

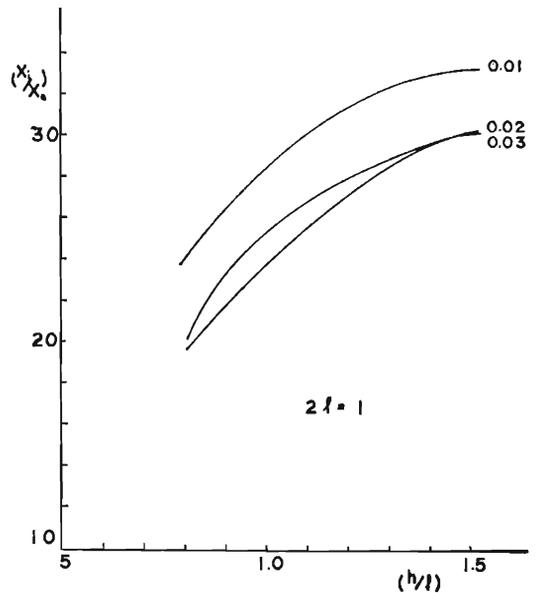
第10図、第11図において、横軸は鋼板タンクの静水位と長辺( $l$ )の比をプロットしたもので、縦軸は横軸の $h/l$ に対応した最大水位と振動床台の変位( $a$ )の比を応答倍率として無次元化したものである。

まず、第10図における応答倍率をみると、長辺が $2l=2$ m、の鋼板タンクは、床台加速度の増分にしたがって応答倍率が減少するのに対して、第11図では逆に増加している。また、第10図と第11図の応答倍率を比較すると、第11図に示す曲線の方が大きい値を示している。

矩形貯槽の長辺が増大するにしたがって貯槽の固有周期が長周期になり、振動床台変位は固有周期 $T$ の2乗で増えることから、自由液面の応答の絶対値が大きくなって、床台変位との比は減少する。また、鋼板タンクの静水位(0.4—0.76m)をパラメータとしたいずれの実験値からも、応答倍率は約20—30倍の値を示した。このことは、スロッシング現象を誘発する地動変位の波形を正弦波と仮定し、液体の粘性および減衰



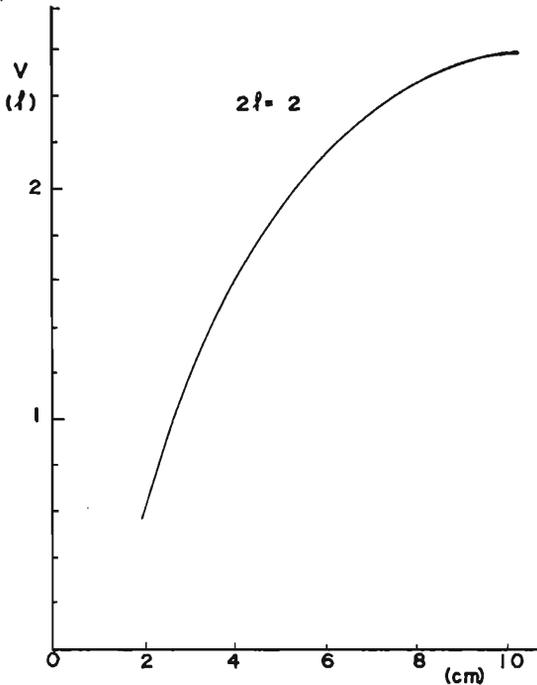
第10図  $X_i/X_o \sim h/l$  曲線 ( $2l=2$ )



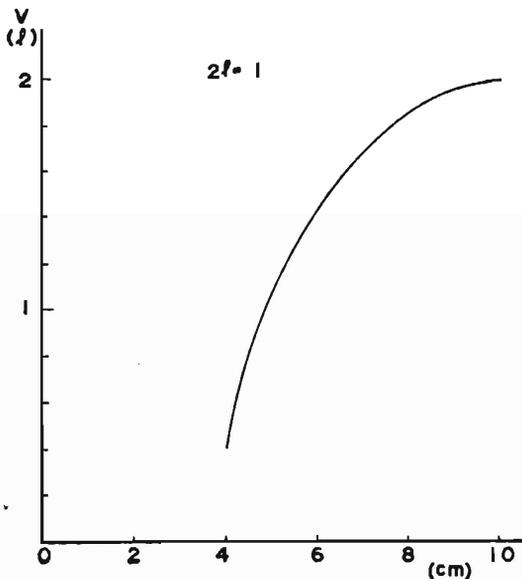
第11図  $X_i/X_o \sim h/l$  曲線 ( $2l=1$ )

を無視した場合、自由液面の応答が地動変位の20—30倍に増幅されるものと考えられる。

Housner理論式における最大上昇液位( $d_{max}$ )には加速度( $\alpha$ )のパラメータ因子がなく、静水位の最大変位角が平均速度応答スペクトルで関連づけられている。(第6図参照)第7図では、やや長周期成分の構造物の平均的な加速度レスポンスとして100gal程度として示されている。本実験では2m、長辺に対して最大30gal長辺1mに対して60gal加速度を抑えたが、これは高加速度領域では波形に乱れが生じて、再



第12図 上昇水位—溢流量曲線 ( $2l=2$ )



第13図 上昇水位—溢流量曲線 ( $2l=1$ )

現性がよくないためである。また、Housner 理論式が線型性を仮定した条件のものであり、強制振動の実験条件によっては、例えば、加速度漸増加振によるか、瞬発加振によるかによっても、自由液面の最大上昇水位が変化した応答倍率も変動する。また、貯槽の形状によっても相当変動するものと考えられることから、理論値と実験値が一致しないことが上述したような理由で説明される。(Housner 式では、矩形と円筒形を分けているが、両者の区別が明確でない理

論式もある。)

次に、溢流防止装置の効果に関連して、矩形貯槽の静水位を 1 m として、10 cm まで水位が上昇したときの液体の溢流量を測定した実験結果を第12図—第13図に示した。

第12図で、上昇水位が 10 cm のとき、2.6 l 溢流するが、これは 1 波共振の値である。したがって、長辺が 2 m の場合で 5 波共振したときの溢流量を求めると、 $2.6(l) \times 10 \times 5 = 130 l$  となる。(ただし静水位が変動しないと仮定しての値である。) 故に 6.5% 溢流することになる。また、第13図で、上昇水位が 10 cm のとき、長辺が 1 m の場合で 5 波共振したときの溢流量を求めると、 $2(l) \times 10 \times 5 = 100 l$  となり、10% 溢流する。また、一般的には、断面積  $S$  での液体の流速を  $V$  とすれば、一波共振に要する時間を  $T$  と仮定して、溢流量  $V$  を求めると、 $V = SVT$  となる。

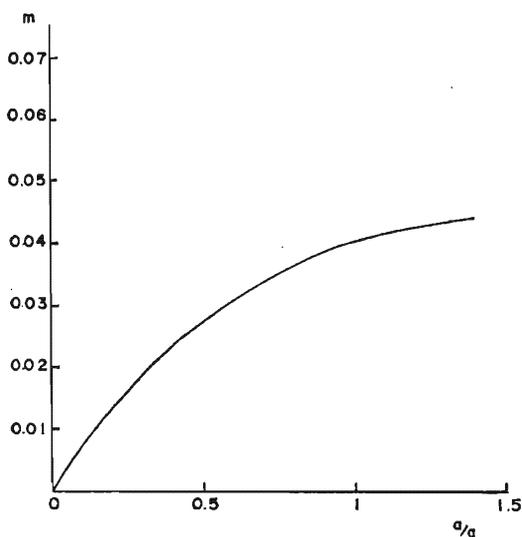
この実験から、第1図に示すタンク内の静水位がタンク側壁頂部の近傍にあるときの強制振動実験においては、上述した結果を得たが、静水位がタンク頂部から相当離れているとき(タンク側壁高さの  $\frac{1}{2}$  程度)、動揺する液体はタンク側に沿って成長し、加振力( $F$ )の増加によって、波形が乱れて崩れる傾向がある。しかし、いずれの静水位にあっても、共振状態では液体の溢流は避けられない。

以上の実験結果から、液体の溢流を防止する装置(第2図)を試作したものである。第2図で、1は波受け板、2は仕切板、3は還流弁、4はタンク本体、5は蝶番である。

本装置の基本的原理は、まず、地震動による数回の揺れ運動で、液体表面が大動揺して、タンクから液体が溢流しても、タンクの外側上部に固定した波受け板に液体が衝突して、波受け板とタンク外側に固定した仕切板によって、液体が偏在することなく、タンク内側に設けた還流弁を通過して液体がタンクに還流するものである。

第14図に動揺する液体がタンク頂部から、どの程度の高さ(振幅)で波受け板に衝突するかを測定した結果を図示した。 $T_0/T = 1$  ( $T_0$ : 静水位  $h$  での固有周期,  $T$ : 強強制振動周期), 水平震度 0.1 ( $\alpha/g$ ) なる条件で、タンク側壁頂部より 4 cm の高さで溢流した。このことから、波受け板の高さとして 10 cm は過大であるが、一般的に、波受け板の高さとして、長辺 ( $l$ ) 又は半径 ( $R$ ) の 8% 以上の高さがなければ、液体の溢流を防止できないことが実験的に明らかとなった。

したがって、波受け板の高さ  $H_d$  は、 $H_d > 0.08 l$  又は  $H_d > 0.08 R$  として、タンク頂部に取りつける必要がある。また、加振力を増加すると、波受け板に衝



第14図 溢流液体の上昇高さ

突した液体がタンクに直接はね返る現象が認められることから、波返し板に丸みを与えることによって、溢流液体の全量を拘束することができる考える。

## 7. 終りに

本研究は、地震予知連絡会の多摩川下流域における土地の異状隆起の指摘により、当庁予防部が緊急対策

の一環として実施した開放型タンク等の拡散防止に関する行政指導に並行して推進してきたものである。

したがって、開放型タンクに関しては当庁の基準により適切な指導がなされており、例えば、筆者らが施設見学した矢口消防署管内においても、ソフト面での有効な対策がなされているが、ここでは、タンクをメカニカルな面にとらえて実験的に検討を加えたものであり、液体溢流防止の一方策として参考になれば幸甚である。

## 参考文献

- (1) 曾我部 潔, 液体貯槽の耐震設計, 日本機械学会誌, 79巻, 第689号 (1975)
- (2) 柴田 碧, 産業施設の耐震設計基準の現状とあり方, (1976)
- (3) 吉川 雄三, 超大型タンクの新しい発想, 日本機械学会誌, 80巻, 第703号 (1977)
- (4) Housner, TID 7024, A. F., 377-383 (1963)
- (5) 大橋, 木村, スロッシング時の非線型応答, 機械学会講演論文集, No. 760-3 (1976)
- (6) 東京消防庁, 破壊的地震時における危険物屋外タンク貯蔵所の基礎地盤強度とタンクの安全性に関する解析報告書, 5-8p (1977)