

危険物の安全化(第1報)

(危険物貯蔵タンクの液面動揺防止装置について)

内 田 稔*
伏 見 英*
北 岡 開 造*

1 はじめに

地震時における危険物施設の安全化研究の一環として、今回はまず石油タンク内液面の挙動と液体の動揺防止による安全化について実験を行なった。

現在石油タンクは、10kl程度の小型のものから10万klと大型のものまで数多くあり、将来も石油は化学工業原料、エネルギー源として、使用量が増加する見込みから国策として貯蔵保有量の増加を進めており、昭和48年度は55日分、昭和49年度には60日分の貯蔵保有量の増加を進めている。これに伴ない石油タンクも大型化の方向に向っている。現在16万klまでのタンクが作られており、技術水準は20万klまで可能となつている。(石油輸入量昭和47年度23,800万kl, 昭和48年度予定28,270万kl, 通産省鉱山石炭局石油計画調べ)

これらの石油タンクは新潟地震にみられたように大きな災害の危険性を潜在的に持っている。この危険性の主要なものは、石油タンク液面の動揺によつて発生する石油の溢流噴出である。またこの液面動揺の反復運動によつて石油タンクの屋根と側壁の接合部分に衝撃圧力が加わることによつて屋根を破壊したり、石油タンクの真円度に影響を与えることも充分考えられる。

これらのことから石油タンクの液面動揺を抑制することにより溢流、噴出等の危険性を排除することを研究の目的とした。実験には、危険排除を考慮した自治省消防庁消防研究所報告等より波の最大変位は、石油類より水が大きいこと、および側壁に与える影響も比重の大きい水が実験条件ではきびしいものと考えられたのでモデルタンクの内容物に水を使用した。

今回は防波板の液面動揺防止効果について検討するため、実物タンクをモデル化した角型水槽を使用して振動実験を実施し、防波効果について基礎的なデータを得たので報告する。

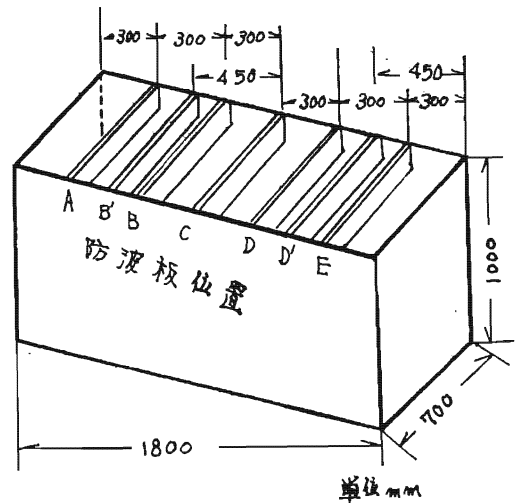
* 第二研究室

2 実験装置および実験方法

(1) 模型角型水槽

一般に石油タンクは円型であるから、モデルとしては円形水槽を用いた方が妥当であるが、予備実験によつて円形水槽と角形水槽とを比較したところ、液体の挙動にほとんど差がなく、また現象とその原因を的確にとらえることができることから、角型水槽を用いることにした。

第1図



杉材製の角型水槽(第1図)を製作した。水槽Iは防波板を取付けるために幅4cmのL型鋼材を使用したもの、水槽IIは防波板を固定するために水槽内に厚さ1cmのベニア板を取付け溝を作つたものである。

この水槽は石油タンクの5,000~10,000klを想定して製作した。寸法は第1図に示すとおりで、5,000klタンクに対して1/14、10,000klタンクに対しては1/18である。水深は第1表から実在タンクの径(ℓ)と深さ(h)の比2.4より実験水槽の径180cmより水深75cmを求め、この値を満水時の水深とした。

第1表 油タンクの直径と液深の関係
(浮屋根)

| 容量(KL) | 直径D(m) | 液深H(m) | D/H |
|--------|--------|--------|-------|
| 5,000 | 24.8 | 10.21 | 2.428 |
| 5,000 | 25.18 | 10.18 | 2.478 |
| 10,000 | 32.93 | 13.21 | 2.493 |
| 10,000 | 31.96 | 13.3 | 2.40 |

満水時の水深を75cmとすると通常のタンクの側壁は満水時の10%増が最大であるので、実験槽では水位が82.5cm以上になれば溢流するものとして取扱った。また短径を70cmとしたのは中心の水の動きが側壁に影響されないことを考慮して定めた。

(2) 防波板

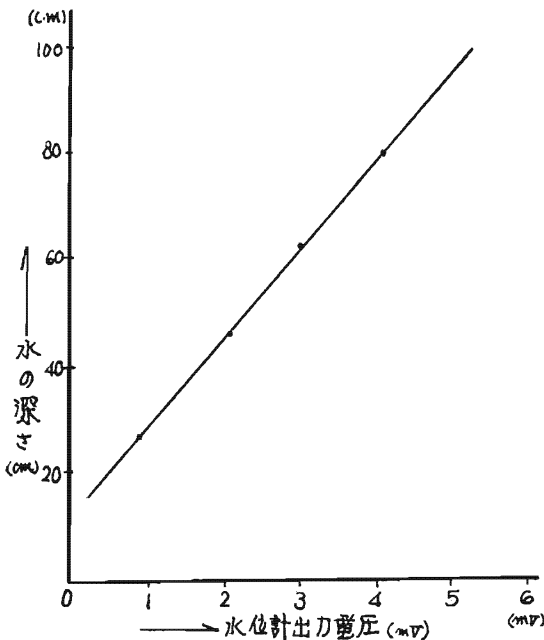
杉材を用いて長方形(長さ70cm幅5, 10, 15, 20cm)のものを各5枚製作し使用した。

防波板は液面に浮遊させると種々の因子が増加するため、側壁に固定して基礎的な数値を求めることを原則とした。

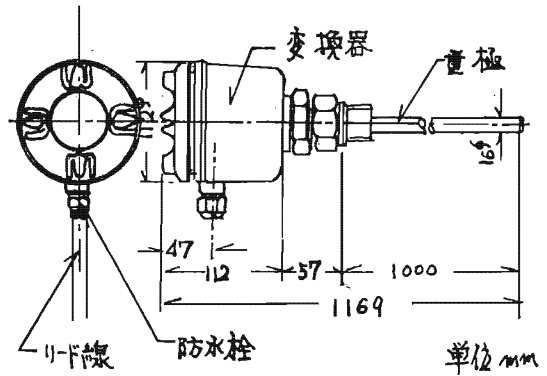
(3) 水位計

水位計については水槽を加振した時に生ずる水面の挙動を水抵抗の変化として検出するため、抵抗型水位計を試作したが、電解現象を生じたり、水面の波高の変位が直線的でなく曲線となるため、今回は静電型水位計(静電容量式レベル発信器)を用いた。

第2図



第3図



この型の水位計は変位応答特性が第2図に示すように直線的であり応答時間も速いのが特長である。第3図に水位計を示す。

水位計の取付位置が壁より少しずれているため、壁面の波高と水位計による波高値に若干の差違が認められた。

(4) 振動試験機の特長

使用した振動試験機は動電型で諸元はつぎに示す通りである。

- 加振力 900kgG 最大速度 650mm/sec
- 最大振幅 150%全振巾 振動方向 水平
- 使用周波数範囲 0.3~100Hz(常用0.5~10Hz)
- 最大搭載重量 2,000kg
- 振動台寸法 2,000mm×2,000mm
- 振動波形 正弦・ランダム・任意波形
- 総合精度 ±3%(1~100Hz)

(5) 記録計

液面動揺による波高はペンレコーダーにより測定し、応答波形は電磁オンロググラフを用いた。

(6) 加振条件

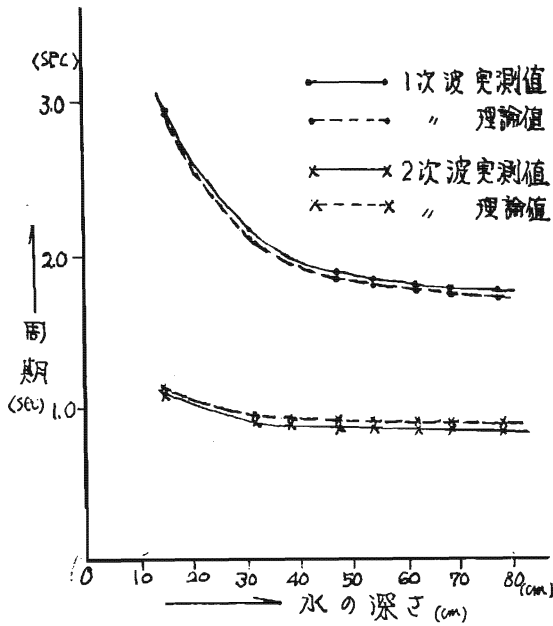
正弦波による水平加振実験を行なった。液面の動揺は、水平振動の繰返しにより影響され、共振時には最大となる。このことより液体の共振周期にて強制加振すれば動揺が最も大きく、悪い条件となるので、正弦波を使用した。また加振力は最大容量時の水位(水深75cm)が水槽外に溢れる直前の値を用いた。

3 実験結果

(1) 共振周期

1次, 2次の共振周期を水槽IIにより求めた。水深は満水時75cmより20%づつ減少した値を求めた結果を第4図に示す。この値は理論式から求めた計算値とよく一致している。このことは実験精度が高かつたものと考えられた。理論式は下記を採用した。

第4図



$$fn = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g(\beta nl)}{L} \tan h \frac{\beta nl}{L} H} \dots \dots (1)$$

n次 1 2 3
 βnl 3.142 9.425 15.71

fn: 振動数(Hz) L: 振動方向の容器幅(cm)

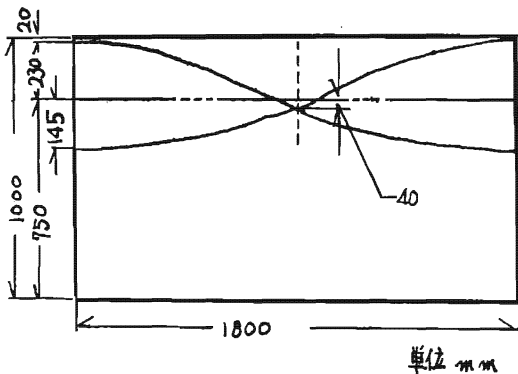
H: 水深 (cm) g: 980cm/sec²

1次共振については水槽Iの満水時の共振周波数は0.600Hzで水槽から水が溢流する直前の値は10galであった。水槽IIでは満水時の共振周波数は0.605Hz, 3galの加振が溢流の直前値となる。以後の加振条件はこれらの値を使用した。2次共振については加振力50galを最大値として行なつた,

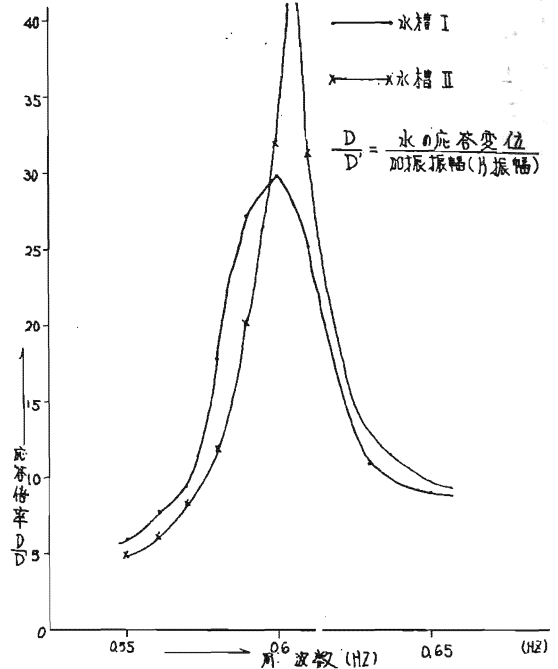
(2) 共振時の水面挙動について

満水時の水槽を1次共振で加振し液面の挙動を時間的にとらえた結果を第5, 第6図に示す。また水平角度でとらえた結果を第7図に示す。

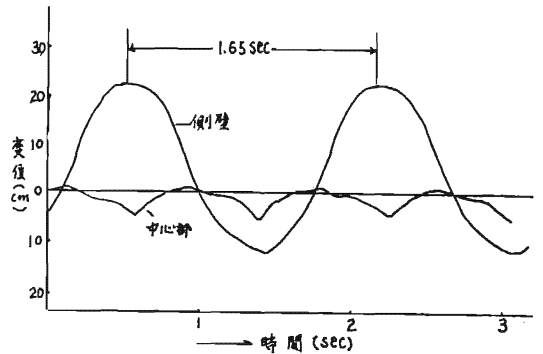
第5図



第6図



第7図



この結果より水の挙動は完全な正弦運動ではなく中心部にみだれが見られる。また波高は静水時にくらべ水面上では大きく、水面下は小さい値を示している。

中心部は常に静水時と同じ高さになく、ほとんど下まわっている、このことは水の動きによるものと考えられる。この動きを浮子を用いて目視観測したところ、中心部が最大の動きとなり中心を0として左右に19cmの動きが認められた。この値は側壁に近くなるに従って小さくなる。これを正弦運動として中心付近の速度を求めると

$$y = a \sin \omega t \quad \omega = 2\pi f$$

$$y' = a\omega \cos \omega t \quad f = 0.605$$

$$= 7.22 \text{ cm/sec} \quad a = 19 \text{ cm}$$

となり大きな流れを持っていることがわかつた。

(3) 防波板の位置および面積の効果

水槽Ⅰで満水時に加振力10gal 周期0.600Hz で強制加振したときの全波高を100とし、防波板を取付けたときの波高の割合を求めた。防波板の取付け位置は第1図に示したA, B, C, D, Eの5点をCを中心に左右対称に取付けた。

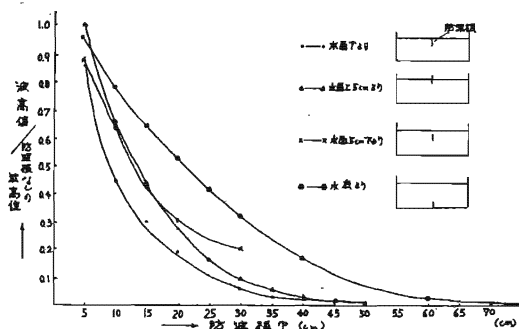
i e点について(水深における位置と面積の効果)

下記の条件のとおり実験を行なった。

- 1 水面下に5, 10, 15cmづつ増して防波板を取付ける。
- 2 水面上に5cmの防波板を取付け1の条件で行なう。
- 3 1の条件を水面下5cmの位置より行なう。
- 4 1の条件を水底より行なう。

第8図

水深75cmにおける防波板の位置
(C点)および面積の効果
(水槽Ⅰ一次波10gal 0.600Hz)



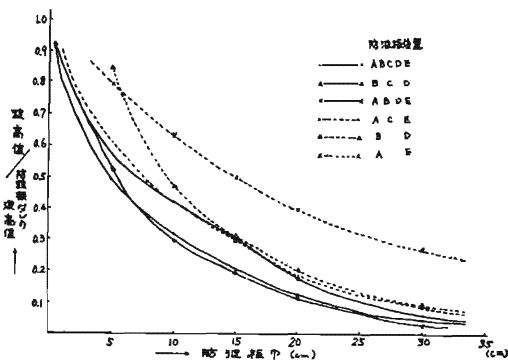
以上の実験結果を第8図に示す。第8図からも明らかなように水面下に防波板を取付けた場合が顕著な効果が認められた。また水槽の底に防波板を取付けてもある程度の効果が表われることは、底部において流れのあることが示された。また完全に仕切つた場合の値はフリーのときの1/50以下の小さな動きであつた。これより防波板は波高を防止するという一次的な意義以上に水面の挙動を防止することにより共振振動数を大きくする。すなわち共振周期を短周期にづらせる働きが考えられた。

ii 水面における位置と面積の効果

iの結果より防波板は水面下に取付ける方法が最も良かったことから防波板は各点とも水面下に取付けた。取付位置は次の6方法とした。

AE, BD, ACE, BCD, ABDE, ABC, DE この結果を第9図に示す。この図から明らかなようにC点から離れた位置よりC点に近い点効果があつた。iの結果を合せ比較すると単位面積当りの効果はC点が最大であつた。(第2表)

第9図



第2表 各位置の防波板の1板当りの効果

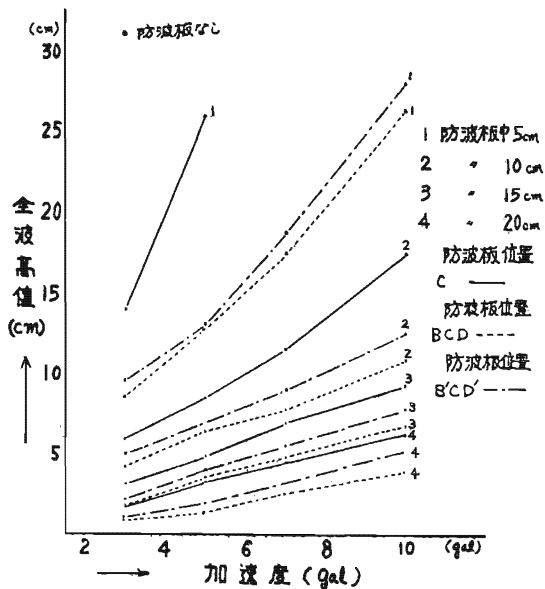
| 防波板の位置 | 防波板の大きさ | 5 cm | 10cm | 15cm | 20cm | 30cm |
|-----------|---------|-------|--------|-------|-------|--------|
| C | | 6.121 | 22.42 | 26.32 | 29.29 | 34.47 |
| A E | | 4.555 | 6.795 | 9.655 | 10.49 | 13.245 |
| B D | | 6.255 | 10.955 | 13.33 | 15.37 | 17.15 |
| A C | | 5.12 | 7.247 | 8.437 | 9.907 | 10.923 |
| B C D | | 6.15 | 8.633 | 9.793 | 10.53 | 11.547 |
| A B D E | | 4.145 | 5.478 | 6.39 | 7.515 | 8.49 |
| A B C D E | | 3.90 | 5.078 | 5.772 | 6.37 | 6.844 |

全波高一防波板を入れた時の波高
防波板の枚数

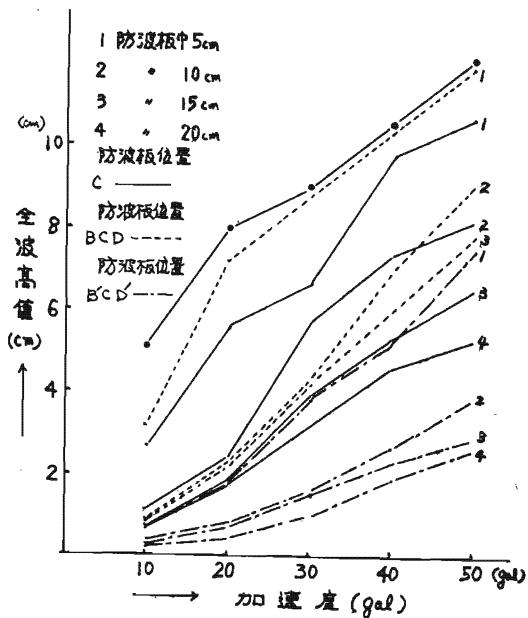
iii i, iiの実験で比較的效果があつた位置C, BCDと2次波を考慮した B'CD'の3点を水槽Ⅱを使用して、各水深について1次2次共振波で実験を行なった結果の代表例を第10~12図に示す。この結果1次波ではiiと同様に中心であるC点の効果が良いことが立証された。2次波ではB'CD'が最も効果があり、BCDが最も効果が悪いことがわかつた。これは2次波の節が3カ所あり1つはC点に他の2カ所はBCよりB'C'に近いとめと考えられた。

iv iiiで行なつたと同様の位置について防波板を浮かした状態(第13図)で実験を行なった結果を第14図に示す。この結果は固定の結果より効果が少なかつた。これは流れの力が大きいため防波板が流れにおされて溝に押しつけられ防波板の上の水が流れるためと考えられた。

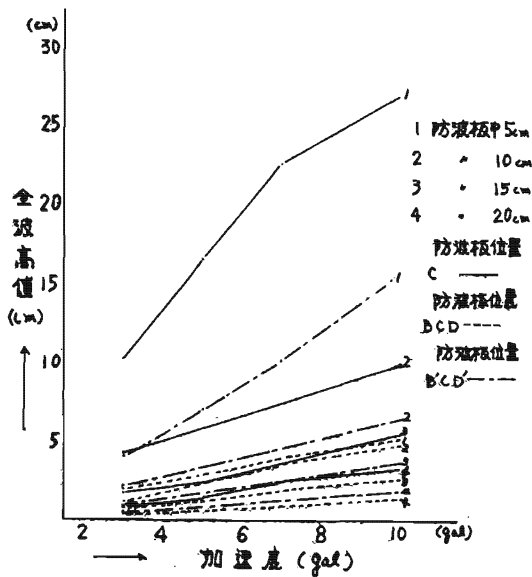
第10图



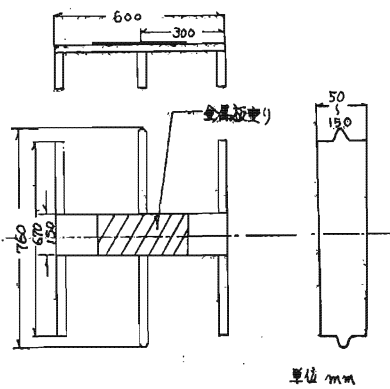
第12图



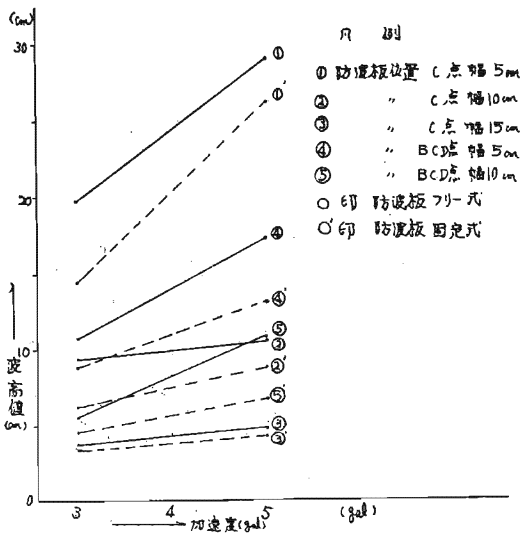
第11图



第13图



第14図



4 考 察

(1) 実験装置について

振動機は加速度、速度、振幅のいずれかを計測器のメーターの指針に合わせて行なうため、再現の際にわずかのづれが起る可能性がある。周波数では有効数の3桁目は目盛がないため目測で合せざるを得ないため共振波の最高を求め再現する時波高を一定にすることができず、約5%以内ではあるが誤差として認められた。

波高が小さくなると誤差は小さく問題とならなかった。

(2) 防波板の位置と面積

1次波を中心として実験を行なった結果、防波板の取付け位置は水槽の中心すなわち波の節にあたる部分が最も効果が得られることがわかった。

槽の中心は流速が最も大きく、このことは中心部では水の動きが大きいためであり、この部分をおさえることが水の動きを止めることの効果をあげることにつながっている。

2次波については節が3カ所あり槽の中心にも節があることから1次ほどの効果ではないが、ある程度の効果があった。

防波板が中心で効果をあげる理由として、水の動きに対し水槽の中心では防波板が垂直になるためであり他の位置では、水の動きは防波板に対し角度をもつためとも考えられた。

これらのことから、防波板の取付けは槽の中心位置が絶対のポイントである。次に面積について見ると、同一面積あたりの効果は水槽の中心点が最も効率よ

く、水面下に40cmの防波板を入れた効果は、完全に仕切った場合と5ヶ所に30cmの防波板を取付けた時とほぼ同じ効果があり、この場合30cm×5枚に比較して21%弱の面積であることから、槽の中心で水深に対し53%強の防波板で充分の効果があげられるものと考えられた。この結果より槽の底部では水の動きは小さいと考えられるが、しかし第8図の結果より底部にも水の動きはあることがわかった。

これらのことから防波板は集中して設定した方が効果的であると考えられた。

(3) 防波板と共振について

径を一定にして水深を増加させると共振点は高周波につれる。また水深を一定とし径を増加させると共振点は低周波につれる。この関係は防波板を水槽に入ると、槽を仕切る形となり、径を変化させると同じ結果を得る。

実験水槽Ⅱを完全に仕切ると槽の一次共振は0.926 Hzとなり、もとの0.605 Hzより高い周波数に移行した。防波板の数および面積を増やし、径を小さくすれば水の動きはなくなり、重心は動かない状態となり剛体に近いものと考えられ、この場合の共振周波数は高周波になる。これらのことから防波板の効果は水の動きをおさえることにより短周期に変える効果を持ち、このことが波高を小さくしたと考えられた。

(4) 水槽の共振現象について

水槽の水を共振周波数で共振させ、この波にランダム波を入れたところ波高、波の動き、その他はほとんど変化は認められなかった。またランダム波はそのままで周波数を変えると波高は小さくなった。水槽の水が共振するときは必要な周波数を選択吸収して共振するものと考えられた。

(5) 実験水槽と実物タンクの相似性について

実験水槽および実物タンクについて、1次共振周波数を理論計算と相似理論計算の両者について比較を行なったところ5,000kl ± 2%, 10,000kl タンクについて ± 4%以内の誤差であつた。このことから相似理論計算によつて、C点における防波板の波高値を実物タンクに適用した場合の値等を第3表に示す。

相似理論式では

| | | |
|-----|--------------------------------------|---------------------|
| 周波数 | $f_m = f_p \sqrt{\frac{1}{\lambda}}$ | m : モデル |
| 周期 | $T_m = T_p \sqrt{\lambda}$ | P : 実物タンク |
| 波高 | $h_m = h_p \lambda$ | λ : m/p (径) |

で示されている。

石油タンクは、通常空間容積が5~10%であるので5%として側壁の高さを求めたところ、5,000kl では50cm、10,000kl で66cm静水時より高くなる。第3表に

第3表 実験値と理論値の比較

| | | 実験水槽 | 5,000klタンク | 10,000klタンク |
|---------------|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 径 | m | 1.8 | 24.8 | 31.96 |
| 水深 | m | 0.75 | 10.21 | 13.2 |
| 一次共振周波数 Hz | 実験値(角) | 0.605 | | |
| | 理論式 | 計算値(角) | 0.612 | |
| | | 計算値(円) | 0.6805 | 0.1793 |
| | 相似理論式 | 計算値(円) | | 0.1833 |
| 一次共振周期 sec | 実験値(角) | 1.653 | | |
| | 理論式 | 計算値(角) | 1.634 | |
| | | 計算値(円) | 1.4695 | 5.5772 |
| | 相似理論式 | 計算値(円) | | 5.4546 |
| 波高 m | 実験値(角)(静水面上) | 0.23 | | |
| | 相似理論計算値 | | 3.179 | 4.084 |
| 防波板効果 のm | 実験値 | 防波板 0.3m 0.01m | | |
| | 相似理論計算 | | 防波板 4.1m 0.16m | 防波板 5.3m 0.20m |

示すとおり、防波板がない場合、例えば10,000klタンクでは4mの波高が考えられるが、防波板5.3mを取り付けた場合、0.2mの波高となり通常の側壁でも充分安全側であるという結果を得た。

5 おわりに

正弦波強制加振による模型角型水槽内の液面動揺は水槽内に固定した防波板が水面の動きをおさえると同時に水槽の共振周期を低周期に変化させ、液面動揺を抑制するという結果を得た。これにより内容物の溢流噴出等は防波板によつて阻止することも可能であるといえるし、いいかえれば大火災発生要因を減少させることが出来る。

しかしながら地震波は、よく知られているように複雑であり、実用面からは、石油タンクの構造上周定式の防波板には問題がある。

今後は浮型の防波板による実験を考えている。

今回は液面動揺と防波板効果の基礎的データを得るために実験を行なつたものである。

参考文献

- 堀内三郎他, 新潟地震にともなう油タンク火災の出火原因等の調査研究, 防災科学技術研究報告第12号抜刷(昭和41年3月)
- 湯本権六, 地震時におけるタンク内の液体および浮屋根の振動とその防止装置 安全工学Vol7 p228, 1968
- 山本善之 地震による石油タンクの液面動揺と衝撃圧力 高圧力第3巻第1号昭和40年
- 加賀万亀夫 地震時における原子炉内の水の振動, (日立評論第45巻第4号, 昭和38年4月p95~99)
- 江村富見 水理模型の相似性について (公害Vol6 No3 P2~P11 1971)