(昭和 42 年 5 月造船協会春季講演会において講演)

長大油そうにおける荷油の運動および制水 隔壁の効果に関する研究 (第 2 報, 制水隔壁の効果)

正員 西 牧 興 正員 原 洋 一
正員 堀 徹 正員 木下 正 昭

On the Dynamic Pressure Caused by Swashing Cargo Oil
in Relatively Long Tanks
(Part 2. Effectiveness of Swash Bulkhead)

by Kō Nishimaki, *Member* Yōichi Hara, *Member*
Tōru Hori, Masaaki Kinoshita, *Member*

Summary

This report presents an experimental study investigating the dynamic pressure exerted on tank walls of ship by swashing internal fluid.

The case, in which no obstacles such as swash bulkheads or deep girders existed in the tank, was reported already in the previous report.

In this paper, the case, in which a swash bulkhead was inserted at the center of the tank, was dealt with.

In the present experiment, second to the experiment described in the previous report, the bulkhead was made of strips, and its breadth and the height of its center were changed systematically, in order to observe the influence of the bulkhead.

From this experiment, we derived the experimental formula for the force acting on the end bulkhead and the swash bulkhead.

In the third experiment, the swash bulkhead of the practical type were tested. The results of this experiment were compared with the ones of the second experiment, and experimental formula were reformed for the use in the actual swash bulkhead.

From the above results, the effectiveness of the swash bulkhead was examined as follows.

At first, with a view to observing the burden of the end bulkhead, the maximum waterhead which could occur on the end bulkhead was calculated by the experimental formula, and the extent of reduction of maximum waterhead by the insertion of the swash bulkhead was examined. Then the limit percentage of the swash bulkhead, which is useful for the reduction of the burden of the end bulkhead was calculated for the arbitrary tank length.

Then, in view of minimum weight design, the effectiveness of swash bulkhead was examined, considering the total force on the end bulkhead and the swash bulkhead.

1 緒 言

各船級協会のタンク長さに対する規定については第 1 報に述べたが、これらの規定に従うと、タンク長さは、制水隔壁がない場合にタンク深さのおよそ 1.1 倍、制水隔壁がある場合には、タンク深さのおよそ 2.2 倍を超えることができない。もしタンク長さをさらに大きくできるものならば、重量軽減その他の点で非常に有利であ

原稿受付 昭和 42 年 1 月 10 日

* 日立造船株式会社技術研究所第 2 研究室

る。

本研究においては、比較的長いタンクにおいて端部隔壁、制水隔壁に加わる力を明らかにするとともに制水隔壁の働きについて考えて見たものである。

タンク内の荷油の運動によって隔壁に働く力については、昭和 32 年日本造船研究協会、第 38 研究部会の研究の一部として取扱われている。この研究ではタンクの長さが深さに比べて比較的小さい場合（およそ 1:1 程度）を対象としているが、理論的取扱いその他注目すべき点が多い。

図1 初期静水圧

図2 傾斜静水圧

本研究の第1報として、タンク内に制水隔壁その他の制水物が無い場合に端部の隔壁に加わる力について報告を行なった。その概略を述べると、隔壁に加わる力は図1のとおりで、タンクが静止している状態において隔壁に加わる静水圧（初期静水圧と呼ぶ）。図2のとおりで、自由表面を拘束したまま静かに角度 Θ (Θ , 縦揺れ角) だけ傾斜させた時に生ずる圧力の初期静水圧からの増加分（傾斜静水圧と呼ぶ）、および自由表面の波動による圧力の三つに分けることができる。このうち波動による圧力は縦揺れ角に左右されない。

これらを式にあらわすと、

$$F_{e0} = F_1 + F_2 + F_{w0}$$

$$\begin{cases} F_1 = \frac{1}{2} \rho B h^2 g & \text{初期静水圧} \\ F_2 = \rho \Theta L \cdot B h g & \text{傾斜静水圧} \\ F_{w0} = 0.77 \rho L B h \frac{b}{D} g & \text{波動による水圧} \end{cases}$$

ただし、 ρ ; 密度、 Θ ; 縦揺れ角、 B ; タンク幅

他は、図3のとおりでである。

今回は制水隔壁が加わった場合について実験を二段階に分けて行なった。すなわち、第一段階（第1報に続き第2次実験）：制水隔壁を水平帯状に作り、その深さおよび中心位置を系統的に変化させ、制水隔壁の働きの基本的特性を調べた。

第二段階（第3次実験）：実船に使用されているような実際の形状を有する制水隔壁をそう入し、第2次実験で得られた結果を一般的なものにまで拡張した。

なお、タンクの運動は第1報と同じく、縦揺れおよびサージングの2種としたが船においては縦揺れが主として問題になると考えられるので今回縦揺れの場合についてのみ報告する。

図3 タンク寸法

2 実 験

2.1 第2次実験

(1) 計測装置 端部隔壁に加わる力の計測については、第1報において詳しく述べたとおりである。制水隔壁に加わる力の計測は図4のとおりにした。すなわちタンク内の4すみ（隅）に支えを作り、それに両端をユニバーサルジョイントにした荷重計を介して図のようにL形鋼を取り付け、さらにこのL形鋼に図の点線のように、長さ約1m、幅10cm、厚さ5mmの帯板を取り付け、この帯板を適当に組合わせることで任意の制水隔壁を作った。制水隔壁全体に加わる力は4すみの荷重計で計測し、また力の深さの方向の分布を計るために、図のように帯板の中央にストレインゲージをはりつけてそのひずみを計測した。

図4 制水隔壁に加わる力の計測

(2) 制水隔壁模型 前項でのべたように制水隔壁は長さ1m、幅10cm、厚さ5mmの帯板を適当に組合わせて作るものであるが、図5のように大きく三つの形に分け実験を行なった。すなわち

(i) L-Type (図5(i)): 断面のF部をふさぐ形式で、隔壁の深さ d_0 はタンクの深さ D の比として、 $d_0/D = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ の4とおり取った。

(ロ) M-Type (図5(ロ))：隔壁の深さ d_0 を一定に保ち、タンク底から隔壁中心までの距離 $\bar{d}$ を変化させる形式である。 $d_0/D=0.2$ のとき、 $\bar{d}/D=0.2, 0.5, 0.8$ の3とおり、 $d_0/D=0.4$ のとき、 $\bar{d}/D=0.4, 0.6$ の2とおり、合計5とおりについて行なった。

図5 制水隔壁の型

(ハ) U-Type (図5(ハ))：断面の上部をふさぐ形式で、隔壁の深さ d_0 は $d_0/D=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ の4とおりとした。その他、断面全体をふさぐ場合の実験も行なった。

(3) 実験方法 実験の目的が、制水隔壁の働きを見ることにあるので、制水隔壁の形を変えることを主にし、他の要素はできるだけ変化を少なくした。

- タンク長さ L は、 $L/D=2.185, 3.785$ の2種
- 縦揺れ角 Θ は $8^\circ 18'$ の1種
- 水深 h は $h/D=0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ の4種
- 制水隔壁の形は、前項に示したように合計14種

以上の場合について、タンク運動周期を1秒～3秒の間で変化させ、端部および制水隔壁に加わる力を動的に計測した。

なお、縦揺れの中心は第1報の場合と同じく、タンク長さの中央、底から400mm (タンク深さ D との比で0.4) の所とした。

2.2 第3次実験

(1) 計測方法 第2次実験の場合と同様、4すみに設置した荷重計によつて制水隔壁に加わる力を計測した。

(2) 制水隔壁の形状 日本造船研究協会第74研究部会において、現在実船において用いられている制水隔壁についてアンケートをとつた。その結果を参考にし、代表的と思われる図22に示すような11種類の制水隔壁を作製して実験を行なった。

以後これらの制水隔壁を図の番号で呼ぶことにする。なお図22中で制水隔壁番号のつぎのかつこの中の数字は、全断面に対する制水隔壁の開口面積の比 (開口率) を表わしている。

これらの制水隔壁のうち上下非対象のものは、図22に描かれたものを上下を逆にして合計13の種類の隔壁について実験を行なった。

(3) 実験方法 タンク長さを実船に似せるため、 $L/D=2.0$ とした。他は第1次、第2次実験と同じである。

3 実験結果

3.1 第2次実験

(1) 端部隔壁に加わる力 F_e 図7, 図8に端部隔壁に加わる力の計測値を周期に対して置点したものの一例を示した。横軸の T_n は第1報と同じくタンク内流体の固有周期を表わしている。図によれば、制水隔壁のそう入によつて、縦揺れに基づく端部隔壁に加わる力 ΔF_e は大幅に減少している。また T/T_n が1より少し大き目の所でゆるやかな極値をとるようである。第1報によれば縦揺れに基づく端部隔壁に加わる力 ΔF_e は、傾斜静水圧 F_2 と、波動による圧力 F_w の二つに分けることができた。このうち傾斜静水圧 F_2 は荷油の運動には関係

図7 端部隔壁に加わる力 (L-Type の制水隔壁が加わった場合)

図8 端部隔壁に加わる力 (U-Type の制水隔壁が加わった場合)

せず、タンクの運動振幅だけに関係する圧力であるので、制水隔壁が加わってもあまり影響を受けるとは考えられず、主に影響を受けるのは、波動による圧力 F_w であると考えられる。

図9, 10, 11 に各形の制水隔壁をそう入した時に端部隔壁に加わる力 ΔF_e の極値を制水隔壁幅 d_0 とタンク深さ D の比に対して置点した結果を示した。図9によれば、 ΔF_e は隔壁の深さ d_0 が大きくなるにつれ減少している。図10, 11によれば、隔壁の深さ d_0 が一定のときは、タンク底から隔壁中心までの距離 $\bar{d}$ には ΔF_e はあまり関係しないように考えられる。以上

図9 端部隔壁に加わる力の極値 (L-Type)

図10 端部隔壁に加わる力の極値 (M1-Type)

のことから U-Type の制水隔壁がそう入される場合を除いて次のような ΔF_e に対する実験式が得られた。

$$\Delta F_e / F_2 = 1 + 0.77 \frac{1}{\Theta D} \left(1 - \frac{d_0}{h} \right) \quad (1)$$

ただし、 d_0 ; 水面下制水隔壁の深さ

または

$$\Delta F_e = \rho \Theta L B h g + 0.77 L B h \frac{6}{D} \left(1 - \frac{d_0}{h} \right) \quad (1)'$$

図 11 端部隔壁に加わる力の極値 (M2-Type)

図 9, 10, 11 における直線は (1) 式を表わしている。(1) 式と実験結果とを比較すると、低水位 (h/D が小) の所で実験値は (1) 式をかなり下回っている。これは制水隔壁のそう入によって減衰力が増し、同調現象を現出させるのがむずかしく、正確に同調点での圧力を採っていないためと考えられる。(1) 式を見ると、波動による力 F_w ((1) 式における第 2 項) において、水深 h が水面下の深さ d_0 の制水隔壁がそう入されたことによつて $h-d_0$ に減少したものと理解される。

U-type の隔壁がそう入された場合には、図に示されるように、隔壁が空気の左右への移動を妨げるため、図の点線のような波に対しては空気が damper として働く。そのため $T/T_n=1.0$ の値は (1) 式で表わされる値よりかなり小さな値をとる。その程度は制水隔壁、タンクの気密状態、 d_w (水面より上の実質部につながった部分の深さ) 等によつて左右される。結局端部隔壁に加わる総力 F_e は初期静水圧を加えて、次式であらわされる。

$$F_e = \Delta F_e + F_1$$

$$= \rho \theta L B h g + 0.77 \rho L B \left(1 - \frac{d_0}{h}\right) b/D + \frac{1}{2} \rho B h^2 g \quad (2)$$

(U-Type のような制水隔壁の場合を除く)

(2) 制水隔壁に加わる力 F_s その形状が対象的である制水隔壁に加わる力を T/T_n について示したものが図 13, 14 である。その特徴を見ると、

U-type のように断面の上部をふさぐ制水隔壁では $T/T_n=1.0$ 付近ではほとんど極値をとらず、 $T/T_n=0.6$ 付近で比較的鋭い極値を取っている (図 13 参照)。一方、L-type のとき断面の F 部をふさぐ制水隔壁では $T/T_n=1.0$ 付近でゆるやかな極値をとり、 $T/T_n=0.6$ 付近では制水隔壁高さがタンク深さに近い場合を除いて一般に極値をとらない (図 14 参照)。この事実は、これらの制水隔壁をそう入した時の波の形を見ると説明できる。すなわち L-Type 制水隔壁に代表されるように隔壁の

図 12 U-Type の制水隔壁が加わった場合の波の形

図 14 制水隔壁に加わる力 (L-Type の場合)

実質部が全て水面上にあるような制水隔壁がそう入される場合には図 15 (f) のような波が生じる時に最も水の運動が激しくなる。このような波は T/T_n がおよそ 1 付近で生じるものであり、このような波はがおよそ 1 付近で生じるものであり、このような波が生じる時には制水隔壁部における水の水の速度は他の箇所と比べ最も大きい。

図 13 制水隔壁に加わる力 (U-Type の場合)

図 15 波の形

この時制水隔壁に加わる力は一般に制水隔壁部での運動量の変化によるものと考えられる。このような力を動圧型の力と呼び F_{sd} で表わすことにする。次に U-Type で代表されるような、隔壁の実質

部が水面より上の空間部を全てふさぐ形の制水隔壁がそう入される場合には、制水隔壁によつて空氣の左右への移動が妨げられるために、(イ)のような波に対しては空氣がダンパーとして働いて同調せず、(ロ)のような波に同調することになる。この波はタンク長さが $1/2$ になった時の固有周期 F_{2n} に対するもので、 T_n との比で 0.6 付近の値となる。(ロ)のような波の時は制水隔壁部での水の速度はほとんど 0 に近い。このような時に制水隔壁に加わる力は隔壁の左右での水面の差による力と考えられる。この力を静圧型の力と呼び F_{ss} で表わすことにする。次に M-Type のように、隔壁実質部が水と空氣にまたがつて存在し、また空氣の左右への移動を妨げない場合には(ハ)のような波が生じる時に力は極値をとる。このような波は一般に T_n と T_{2n} の中間の周期で生じるものであつて、この時には動圧型の力、静圧型の力がともに働くことになる。以下に各々について実験値をまとめ実験式を求めることにする。

(a) 動圧型の力 F_{sd} 隔壁部の状態を模式的に描くと図 16 のようになる。図よりわかるようにタンク底からタンクの回転中心 H までの距離が一定ならば、タンク底から隔壁中心までの距離 d が小さくなると水と隔壁の相対的な速度は大きくなる。したがつて制水隔壁に働く平均的圧力 (F_{sd} を隔壁の深さ d_0 で割つた値) は $\bar{d}$ が小さくなるにつけ大きくなることが予想される。また、隔壁の深さ d_0 が大きくなれば、水の速度 V そのものが小さくなると考えられる。このようなことを考慮して実験値をまとめると図 17 のようになる

 図 16 動圧型の力 F_{sd}

図によれば、 F_{sd}/d_0 は $\bar{d} + \frac{d_0}{2}$ に比例して減少するように見える。この図より F_{sd} に対する実験式を求めると、

$$F_{sd}/F_2 = \frac{d_0}{h} \left\{ 0.7 + 10b/D - (10.5b/D - 0.5) \frac{1}{h} \left(\frac{1}{2} d_0 + \bar{d} \right) \right\} \quad (3)$$

あるいは

$$F_{sd} = \rho g B L d_0 g \left\{ 0.7 + 10b/D - (10.5b/D - 0.5) \frac{1}{h} \left(\frac{1}{2} d_0 + \bar{d} \right) \right\} \quad (3)'$$

となる。(3) 式を見ると、 F_{sd} は $\bar{d}$ が大きいほど小さく、 d_0 については二次式となり、ある d_0 の値で最大値

図 17 制水隔壁に加わる力の極値

をとる。図 17 に (3) 式を示したが実験値とよく合致しているのがわかる。しかし $h/D=0.9$ の場合には実験点は (3) 式をかなり下回っている。これはタンク天井の影響等が効いて他の場合とは違った現象が起きているものと考えられる。

(b) 静圧型の力 F_{ss} 静止時の制水隔壁部が図 18 (i) のようなものであるとすると、同調時の水面の形は図 18 (ii) のようになる。この時制水隔壁に加わる力を水面の差が d_w のように、制水隔壁を境に $2d_w$ であると考え計算すると、

$$F_{ss}=2\rho B d_w^2 g \quad (4)$$

(4) 式と実験値を比較すると、図 19 のようになり、かなりよく合致しているといえる。

なお、 $L/D=2.185$ のときのようにタンク長さが深さに対して短い場合には、実験値は (4) 式をかなり下回るが、これは図 18 (iv) のような波が生じる時、波長に対し波高が大きくなり波の形が崩れ十分に Head 差を維持できないためと考えられる。

(4) 式からわかるとおり、静圧型の力はタンク長さ、水の深さには関係のない力である。したがって動圧型の力 F_{sd} に比べるとタンク長さが大きく、水深の大きい場合には小さく、逆にタンク長さが小さく、水深が小さい時は大きい値となる。

図 18 静圧型の力 F_{ss}

図 19 静圧型の力 (実験値との比較)

(c) 混合型の力 F_{sm} 制水隔壁が図 20 (i) のように、水と空気にまたがる実質部を持つ場合、隔壁には (1) (2) で述べた動圧型の力と静圧型の力が同時に働く。すなわち、

$$F_{sm}=F_{sd}+F_{ss} \quad (5)$$

(5) 式の計算に当つて F_{sd} は (3) 式によつて計算するが、この時 (3) 式の d_0 は水面下の実質部の深さを表す。(図 20 (i) のような部分だけで制水隔壁ができていなければ $d_0=d_w$ である。)

また F_{ss} は図 20 のような場合、 d_d と d_w のうちの小さい方に支配されその 2 倍が水面の差として表われると考えられる。すなわち

$$F_{ss}=2\rho B d'^2 g \quad (6)$$

ただし、 $d'=\min(d_d, d_w)$

(6) 式には (4) 式が含まれる。

3.2 第 3 次 実験

(1) 端部隔壁に加わる力 図

図 20 混合型の力 F_{sm}

22 で示される各制水隔壁をタンク中央に設置し、端部隔壁に加わる力の初期静水压からの増加分を計測した。計測値を水面下の隔壁の深さ $\bar{d}_0$ について描いたものが図 21 である。ここに $\bar{d}_0$ は水面下の隔壁実質部面積をタンクの幅 B で割った値をとった。図中の数字は図 22 に示される制水隔壁の番号を表わしている。また図中には第 2 次実験で得られた実験式 (1) をも示した。図を見ると、特に低水位において計測値は (1) 式を下回っている。これは計測値が必ずしも同調点での値を取っていないためで、低水位でも十分注意して実験し、十分同調した所で計測すると (1) 式の値にまで上がることが、繰返して行なつた実験によつて確かめられた。一般に端部隔壁に加わる力は制水隔壁に加わる力に比べ同調に対し敏感であり、同調をはずれると減少ははなはだし

い。

以上を考えると (1) 式は実際形状を持つ制水隔壁についても十分成り立つことがわかつた。すなわち

$$\Delta F_e/F_2=1+0.77\frac{6}{\pi D}(1-\bar{d}_0/h) \quad (7)$$

ここに $\bar{d}_0=(\text{水面下隔壁実質部面積})\div B$

なお、端部に加わる力は、ほとんど水面下の制水隔壁の開口度によつて定まり、その開口の細かさによる差異

図 21 端部隔壁に加わる力 (第三次実験)

図 22 制水隔壁に加わる力 (第三次実験)

はほとんど現われず、その影響は非常に小さいものと考えられる。

(2) 制水隔壁に加わる力 図 22 に示される各制水隔壁に加わる力を各水位で計測し、(3) 式の計算値と比較した。(3) 式の計算にあたっては d_0 , $\bar{d}$ を次のようにとつた。

$$\begin{aligned} \bar{d}_0 &= (\text{水面下制水隔壁実質部面積}) \div B \\ \bar{d} &= (\text{タンク底から水面下制水隔壁実質部中心までの距離}) \end{aligned}$$

第2次実験の結果によれば、(3)式で表わされる動圧型の力 F_{sd} の他に静圧型の力 F_{ss} も加わると考えられるが、このような実際の形状を持つ制水隔壁では(6)式で表わされる d' は一般に小さいと考えられるので無視した。図22を見ると計測値は $h/D=0.9$ の場合を除きよく合致しており、実際の形状を持つ制水隔壁に対しても十分(3)式が成り立つことを示している。端部隔壁に加わる力の場合と同じく穴の細かさはほとんど関係ない。特別に水が深い場合 ($h/D=0.9$ のとき) 計測点は計算値を大幅に下回るが、この現象は第2次実験でも見られ(図17参照)、このような高水位では天井の影響が強くなり他の場合とは全く違った現象が起こっているものと思われる。

以上(1)(2)の結果より、第2次実験で得られた結果が実際の形状を有する制水隔壁にも適用できることがわかった。

4 考 察

一般的に言えばタンクの長さは長ければ長いほど、重量軽減、工作手間の減少などの点で都合がよい。しかしタンクの長さを大きくすると当然荷油の運動による力が増大し強度上の問題が生じてくる。その程度がどの程度のものであるか、また制水隔壁に加わるとそれがいかに変わるものであるかをまず考えてみることにする。

(1) 端部隔壁に加わる負担 制水隔壁に加わる圧力は初期の静水圧に類する圧力が働かないため、端部隔壁に加わる力に比べ小さく、船における制水隔壁設計の面から考えると、制水隔壁設計の他の要因(たとえば隔壁のせん断強さ)から求められる寸法(板厚)は、制水隔壁に加わる水圧を耐えるには十分であると考えられる。そこで端部隔壁だけに注目し、その負担を考えてみる。

このように隔壁が流体から受ける負担を考えるとき、どのような値をとるべきかはかなり問題の多い所であるが、ここでは隔壁に加わる最大水頭差を考えることにする。

第1次、第2次実験の結果、端部の隔壁に加わる力は、初期の静水圧による力 F_1 、タンクが傾斜することによる静圧の F_1 からの増加分 F_2 および波動による圧力 F_w の3つに分けることができた。このうち F_1 は水深に比例して分布し、 F_2 、 F_w はほぼ均等に分布することが第1、第2実験でわかっている。そこで端部隔壁に加わる力 F_e の分布を図23のように仮定する。すなわち F_2 は水面下の部分で等分に分布し、 F_w は全断面に等分に分布するとする。すると隔壁最下端での水頭差 H は、 $F_2 = \rho g L B h g$ 、 $F_{w0} = 0.77 \rho L B h \frac{b}{D} g$ であるから

$$H = h + \theta L + 0.77 \frac{h}{D} \frac{D-h}{D} L \quad (9)$$

ここで両辺を D で割り、 $H/D = H'$ 、 $h/D = h'$ とすれば

$$H' = h' + \theta \frac{L}{D} + 0.77 \frac{L}{D} h' (1-h')$$

(9)' 式において、 H' が最大となる水深 $h'm$ を求めると、

$$h'm = \begin{cases} 1 & L/D \leq 1.3 \\ 0.50 + 0.65(D/L) & L/D > 1.3 \end{cases} \quad (10)$$

(10) 式を、(9)' 式に代入し、最大水頭差 $H'_{\max}$ を求めると、

$$H'_{\max} = \begin{cases} 1.0 + \theta \frac{L}{D} & L/D \leq 1.3 \\ 0.50 + 0.325 L/D + 0.192 L/D + \theta L/D & L/D > 1.3 \end{cases} \quad (11)$$

(10)、(11) 式より、 $L/D < 1.3$ のような短いタンクにおいては満タンクの状態が隔壁にとつて最も負担が大きいいといえる。

(11) 式をグラフに描くと図24のようになる。図には NK ルールによる値をも示しておいた。NK ルールの適用範囲である $L/D < 0.9 \sim 1.2$ の範囲では、 $\theta = 0.175$ (約 10°) とした場合に NK ルールにほとんど同じく、 $\theta = 0.100$ とした場合には NK ルールを下回っている。 L/D が大きい範囲では波動による圧力の影響が強く H' は $L/D = 5.0$ の所で見ると $\theta = 0.175$ において 2.4、 $\theta = 0.100$ でも 2.0 とかなり大きな値を取る。

図23 各水圧の分布

図 24 制水隔壁がない場合に端部隔壁に加わる最大差 P_{ead}

図 25 制水隔壁が端部隔壁最大 Head 差に及ぼす影響

加わる力は初期の静水圧と傾斜静水圧だけであつて、波動による圧力を逃れることができる。いまこの限界の開口率を限界開口率 λ_l と呼び、値を求めると、(15) 式より

$$\lambda_l = 1.3 \frac{D}{L} \quad (16)$$

これをグラフに描くと、図 26 のようになる。

開口率を λ_l より小さくしても H'_{max} は初期静水圧と傾斜静水圧の和 $1.0 + \theta \frac{L}{D}$ より小さくなることはないので意味がないということになる。特に $\frac{L}{D} \leq 1.3$ の範囲では全く制水隔壁が不用ということになる。

次に最小重量設計の面から問題を考えてみることにする。一般に力が等分に隔壁に加わるとすると、隔壁の重量 W と隔壁に加わる力の合力 F_t とは $W \propto F_t$ の関係にあるものと考えられる。一方静水圧のように深さに比例するように働く時には $W \propto F_t$ の関係にあるものと考えられる。荷油の運動によつて生じる力は、静水圧型の力と等分布型の力が共に加わ

次に制水隔壁をそう入した場合について考えると、タンクの傾斜による力 F_2 はその力の性質上制水壁隔の影響を受けず第 2 次実験の結果、 $F_2 = \rho \Theta L B h g$ 、 $F_w = 0.77 \rho L B h \frac{b}{D} \lambda g$ となる。ここに λ は水面下隔壁の開口度を表わし、

$$\lambda = \left(1 - \frac{\bar{d}_0}{h}\right) \quad (12)$$

$\bar{d}_0$ は (8) 式によつて計算することができる。

これら F_2 、 F_w を同じく図 23 のように分布すると仮定し、隔壁最下端の水頭差 H を求めると、 $H' = H/D$ 、 $h' = h/D$ として

$$H' = h' + \theta \frac{L}{D} + 0.77 \frac{L}{D} h' (1 - h') \lambda \quad (13)$$

H' が最大となる水深 h' m を求めると、

$$h' m = \begin{cases} 1.0 & L/D < 1.3 \frac{1}{\lambda} \\ 0.5 + 0.65 \frac{D}{L} \frac{1}{\lambda} & L/D > 1.3 \frac{1}{\lambda} \end{cases} \quad (14)$$

(14) 式を (13) 式に代入して最大の水頭差 H'_{max} を求めると、

$$H'_{\text{max}} = 1.0 + \theta \frac{L}{D} \quad L/D \leq 1.3 \frac{1}{\lambda}$$

$$0.5 + 0.325 \frac{D}{L} \frac{1}{\lambda} + 0.192 \frac{L}{D} \frac{1}{\lambda} + \theta \frac{L}{D} \quad L/D > 1.3 \frac{1}{\lambda} \quad (15)$$

(14)、(15) を見ると、傾斜静水圧を除けば、他は (10)、(11) においてタンク長さ L が λL に減少したものと同様の結果になっている。

式 (15) をグラフに描くと図 25 のようになる。図のように λ を適当に小さくすれば、 L/D が大きくなつても、隔壁にとつて最も負担の大きい状態を満タン時とすることができ、この時隔壁に

図 26 限界開口率

る状態と考えられるので、一般に $W \propto F_t^n$, $\frac{1}{2} \leq n \leq 1$ の関係にあるものと考えられる。ここではす単に $n=1$ の場合について考えてみることにする。この時、制水隔壁を含めたタンクの重量を最小にするためには、制水隔壁および端部隔壁に加わる力の合力を最小にすればよいことになる。そこでこの値を計算すると、まず制水隔壁がない状態でタンクに働く力 F_{t0} は、一つのタンクに二つの端部隔壁があるから、第1次実験の結果より

$$F_{t0} = 2F_{e0} = 2(F_1 + F_2 + F_{w0}) \quad (17)$$

ここに F_{w0} は制水隔壁がない場合の波動による力で

$$F_{w0} = 0.77 \frac{b}{\Theta D} F_2 \quad (18)$$

次に制水隔壁がある状態でタンクに働く力 F_t は、端部隔壁に加わる力と制水隔壁に加わる力の和を考えて、

$$\begin{aligned} F_t &= 2F_e + F_s \\ &= 2(F_1 + F_2 + F_{w0}) + F_s \end{aligned} \quad (19)$$

よつて制水隔壁を入れたための変化量 ΔF_t は (17) (19) より

$$\begin{aligned} \Delta F_t &= F_{t0} - F_t \\ &= 2(F_{w0} - F_w) - F_s \end{aligned} \quad (20)$$

実際の形状を持つ制水隔壁では、 F_s はほとんど動圧型の力 F_{sd} であつて F_{ss} は無視できると考えると (第3次実験参照) (1) (3) (18) より (20) を計算すると、

$$\begin{aligned} \Delta F_t / F_2 &= 1.54 \frac{b}{\Theta D} \frac{\bar{d}_0}{h} - \left\{ 0.7 + 10b/D - (10.5b/D - 0.5) \frac{1}{h} \left(-\frac{1}{2} \bar{d}_0 + \bar{d} \right) \right\} \frac{d_0}{h} \\ &= \left\{ \left(\frac{1.54}{H} - 10 \right) \frac{b}{D} + (10.5b/D - 0.5) \frac{1}{h} \left(-\frac{1}{2} d_0 + d \right) - 0.7 \right\} \frac{d_0}{h} \end{aligned} \quad (21)$$

(21) 式を見ると、 ΔF_t は b/D , d/h については一次、 $\frac{\bar{d}_0}{h}$ については二次式となつてゐる。 ΔF_t を $\frac{\bar{d}_0}{h}$ についてグラフに描くと、図 27 のようになる。 ΔF_t が最少になる $\frac{\bar{d}_0}{h}$ の値 $\frac{\bar{d}_{01}}{h}$ は、

$$\frac{\bar{d}_{01}}{h} = \frac{0.7 - \left(\frac{1.54}{\Theta} - 10 \right) \frac{b}{D}}{10.5b/D - 0.5} - \frac{\bar{d}}{h} \quad (22)$$

ΔF が正となる限界の $\frac{\bar{d}_0}{h}$ の値 $\frac{\bar{d}_{02}}{h}$ は、

$$\frac{\bar{d}_{02}}{h} = \frac{2\bar{d}_{01}}{h} \quad (23)$$

これらを $(\bar{d}/h, \bar{d}_0/h)$ 平面で考えてみると、 $\bar{d}_0, \bar{d}$ の定義より $\bar{d}, \bar{d}_0$ は図 28

図 28 制水隔壁が効果のある範囲

ここで

$$\eta = \Delta F_t / F_{t0} \quad (25)$$

とすれば、 η は制水隔壁を入れたための力の減少の割合を示す。これを制水隔壁の制水効果率と呼ぶことにする。(23) 式より η は

$$\frac{\bar{d}_0}{h} + \frac{2\bar{d}}{h} > \frac{1.4 - \left(\frac{1.54}{\Theta} - 10 \right) \frac{2b}{D}}{10.5b/D - 0.5} \quad (26)$$

において正となる。また (21) 式より η は

図 27 制水隔壁深さの影響

$$\frac{\bar{d}_0}{h}=1, \quad \frac{\bar{d}_0}{2h}+\frac{\bar{d}}{h}=1.0$$

のとき最大となり、

$$\eta_{\max}=\frac{\left(\frac{1.54}{\Theta}+0.5\right)\frac{b}{D}-1.2}{2+\frac{h}{\Theta L}+1.54\frac{b}{\Theta D}} \quad (27)$$

(27) 式 $\eta_{\max}$ は L, Θ, b が大きいほど大きい。すなわちタンク長さが大きく、縦揺れ角が大きく、低水位と
いつた、水の運動が激しい時ほど制水効果がある。 $\Theta=0.100$ (約 6°) $D/L=\frac{1}{4}$, とし $b/D=0.2$ ($h/D=0.8$)
のとき $\eta_{\max}$ を計算すると 0.28 , $b/D=0.4$ ($h/D=0.6$) のとき 0.51 となる。

5 結 言

タンク内に制水隔壁がない場合については、第1報で述べたので、ここでは主として制水隔壁のある場合につ
いて得られる結果を報告した。これを要約すると次のようになる。

(1) 端部隔壁に加わる力

(a) 第1報によれば、端部に加わる力は、初期の静水圧による力 F_1 , タンク傾斜による初期静水圧からの
静水圧増加分 F_2 , および波動による力 F_{w0} の三つに分けることができるが、制水隔壁のそう入によつて減少す
るのは F_{w0} だけであることがわかった。

(b) 制水隔壁の水面下の深さを $\bar{d}_0$ とすると、端部に加わる波動による力 F_w は F_{w0} における水深 h を
 $h-\bar{d}_0$ にした場合に等しい。

(c) 波動による力 F_{w0} はタンク長さが大きくなると、かなり大きくなるが、制水隔壁を入れればこれを減
少させることができ、ある値以下の開口率を持つ制水隔壁を入れれば、端部隔壁の負担を満タンク時以下にする
ことができる。

(d) 端部隔壁の負担を満タンク時以下にする限界の制水隔壁開口率が得られた。特に $L/D < 1.3$ の範囲で
は全く制水隔壁の必要がないことがわかった。

(2) 制水隔壁に加わる力

(a) 隣水隔壁に加わる力は、動圧形の力 F_{sd} と静圧形の力 F_{ss} の2つに分けることができる。

(b) 動圧形の力 F_{sd} は制水隔壁部での水の運動量変化に由来する力と考えられ、実験式が得られた。

(c) F_{sd} に関する実験式によれば、水面下制水隔壁の重心位置が水面に近づくほど、 F_{sd} は小さくなり、水
面下制水隔壁の深さ d_0 については二次式となり、ある深さ $\bar{d}_0$ において F_{sd} は最大値を取る。

(d) 静水圧の力は、制水隔壁部での水面の差に由来する力と考えられ、水面付近の制水隔壁の構造のみによ
つて決まる。

(e) 実際の形状の制水隔壁では特殊な例を除き、制水型の力 F_{ss} は無視できるが、タンク長さが短く、低
水位で水面付近の制水隔壁構造が悪いと、他の力に比較してかなり大きな力となる。

(3) 制水効果率

(a) 制水隔壁がない状態とある状態についてタンクに加わる力の総和を比較し、ない状態からの減少量 ΔF_t
を求めると、 ΔF_t は隔壁の構造によつて正負に変化する。

(b) 一般に ΔF_t は水面下隔壁の深さ $\bar{d}_0$ が大きく、水面下隔壁の重心位置が水面に近いほど大きい。

(c) ΔF_t は制水隔壁がない状態でタンクに加わる力 F_{t0} で割った値 η を制水効果の程度をあらわすと考え
ると、 η はタンク長さが大きく、縦揺れが大きく、低水位のとき大きくなる。

(d) $L/D=4.0$, $\Theta=0.100$ rad (約 6°) のとき、 η が最大となる制水隔壁構造における値を求めると、 h/D
 $=0.8$ のとき 0.28 , $h/D=0.6$ のとき 0.51 となる。

本研究は運輸省試験研究補助金を受けて日本造船研究協会第74部会が実施中の研究の一部として行なわれた
もので、これまで種々のご討議をいただいた同研究部会の委員各位に厚くお礼申し上げる。

報告を終るにあたり、種々ご指導を賜わった阪大寺沢教授、東大山本教授に心から感謝する次第である。

参考文献

- (1) 「超大型船の構造法に関する研究」日本造船研究協会報告 33 号 (昭和 36 年 10 月)
 - (2) 萩原考一, 山本義之著「荷油槽に生じる衝撃圧力の理解的研究」造船協会論分集 12 (昭和 37 年 12 月)
 - (3) 西牧興ほか 3 名著「超大油槽内の運動によって生ずる動的荷重について (第 1 報制水隔壁がない場合の実験結果) 造船協会論文集 119 (昭和 41 年 6 月)
-