

(昭和 36 年 11 月造船協会秋季講演会において講演)

船体縦通材の有効性に関する研究

(第 4 報 縦通隔壁)

正員 田代新吉

On the Effectiveness of the Longitudinal Members of Ships

(Report No.4 Longitudinal Bulkhead)

By Shinkichi Tashiro, Member

Summary

The aft end of longitudinal bulkhead in tanker is, in most cases, situated at or near the section where shearing force acting on the hull is maximum in its after body.

Therefore, it is one of the important problem in longitudinal strength of tankers that how much shearing force is loaded by longitudinal bulkhead.

The author studied the problem both theoretically and experimentally. As the results, the aft end part of longitudinal bulkhead loads high percentage of the total shearing force has become clear.

1 緒

船体に働く剪断力は、通常船首尾から $L/4$ 付近において最大となるが、油槽船の縦通隔壁の後端の位置は概ねその付近にあるものが多い。従つて、縦通隔壁が剪断力をどの程度負担しているかと言うことは油槽船の縦強力上大きな問題点の一つである。

このような問題については、すでに山越¹⁾および守屋他²⁾等の研究があるが、著者はこれらとは別の観点から調べた。

一般に、油槽船がある荷重状態で撓みを生ずると、その船側外板と縦通隔壁の間、もしくは縦通隔壁が数条設けられている場合はそれらの相互間に相対変位を生ずる。この相対変位は、これら縦通材間に通常多くの横置隔壁や transverse ring が設けられていてそれを生ずるのに抵抗する横剛性が非常に大きいため、一般には僅かである。しかし、その相対変位と横剛性とを積で表わされるそれら縦通材間の相対反力は、縦通隔壁端部付近の剪断力に対しては無視し得ない影響力を有している。

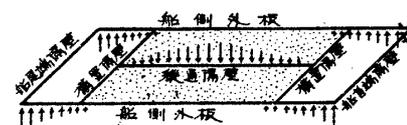
著者は数年前から頭記題目の下に、船体縦通材の縦強力的な寄与について調べてきたが、今回上記の点について理論的な解析と同時に模型試験によつて実験的にも調べた結果、油槽船の縦通隔壁はその後端部付近において一般にかなり高い剪断力の負担率を有していることが分つた。さらに、縦通隔壁を機関室内に延長した場合に、どの程度効果的であるかについても検討したので、これらについて報告する。

なお、紙数の関係上、前報³⁾と説明の重複する箇所は省略した。また、記号も今回特記したもの以外は前報と同様またはそれに準ずる。

2 船側外板と縦通隔壁または縦通隔壁相互間の相対変位

2.1 縦通隔壁 1 枚の場合

前述したように油槽船はその油槽の長さの間に多くの横置隔壁や transverse ring が設けられており、これらは船側外板と縦通隔壁の間に相対変位を生ずるのに抵抗する剛性を有している。いま、この剛性を縦通隔壁の長さに見つて平均化して考え、これを k_T とする。また、縦通隔壁端には一般に cofferdam が設けられ、端部の横剛性が強くなっているからこの箇所のパネ常数を、特に k_T と区別して考え



第 1 図 油槽船を模した骨組み構造とその荷重

原稿交付 昭和 36 年 6 月 20 日

* 日本海事協会

ることとし、 k_e とする。

簡単のために、船体を第1図に示すような骨組みと考える。この骨組みはそれぞれ船側外板、縦通隔壁、横置隔壁および船首尾端隔壁を意味しているものとし、さらに、縦通隔壁の長さに亘つて縦通隔壁と船側外板の間にバネ常数 k_f をもつ弾性板のようなものが設けられているものとする。いま、この模型に図に示すような力が作用して全体として平衡しているものとし、このとき生ずる縦通隔壁（パネル W-1）および船側外板（パネル W-2）の撓みをそれぞれ $\delta_{w1}(x)$ および $\delta_{w2}(x)$ とする。しかるときは

$$EI_{w1} \frac{d^4 \delta_{w1}(x)}{dx^4} = w_{w1}'(x) - k_f \{ \delta_{w1}(x) - \delta_{w2}(x) \} + 2 \overline{F_{w1}} \quad (1)$$

$$EI_{w2} \frac{d^4 \delta_{w2}(x)}{dx^4} = w_{w2}'(x) + \frac{k_f}{2} \{ \delta_{w1}(x) - \delta_{w2}(x) \} + 2 \overline{F_{w2}} \quad (2)$$

と書くことができる。ここに EI_{w1} および EI_{w2} はそれぞれ縦通隔壁および船側外板の曲げ剛性である。

これらの式から、相対変位に対する式として

$$\frac{d^4 \{ \delta_{w1}(x) - \delta_{w2}(x) \}}{dx^4} = \frac{w_{w1}'(x)}{EI_{w1}} - \frac{w_{w2}'(x)}{EI_{w2}} - \left(\frac{k_f}{EI_{w1}} + \frac{k_f}{2EI_{w2}} \right) \{ \delta_{w1}(x) - \delta_{w2}(x) \} + \frac{2 \overline{F_{w1}}}{EI_{w1}} - \frac{2 \overline{F_{w2}}}{EI_{w2}} \quad (3)$$

をうる。(3)式から、相対変位には縦通隔壁端に作用する端部反力 F_{w1} および F_{w2} が関与するが、縦通隔壁に亘つて連続分布した反力も、もともとある間隔で集中的に作用する反力を平均化したもので近似したのであるから、相対変位に関する反力としては連続分布した項のみを考えることとし F_{w1} および F_{w2} の影響は後述するように一様な相対変位量として δ_e に関係するものと考え、(3)式の代わりに

$$\frac{d^4 \{ \delta_{w1}(x) - \delta_{w2}(x) \}}{dx^4} = \frac{w_{w1}'(x)}{EI_{w1}} - \frac{w_{w2}'(x)}{EI_{w2}} - \left(\frac{k_f}{EI_{w1}} + \frac{k_f}{2EI_{w2}} \right) \{ \delta_{w1}(x) - \delta_{w2}(x) \} \quad (3')$$

について考える。

(3')式の解は、積荷が船幅方向に一様であるときは、近似的に次のように表わすことができる。

$$\delta_{w1}(x) - \delta_{w2}(x) = C_1 \cos h \rho \left(x - \frac{L}{2} \right) \cos \rho \left(x - \frac{L}{2} \right) + C_2 \sin h \rho \left(x - \frac{L}{2} \right) \sin \rho \left(x - \frac{L}{2} \right) \quad (4)$$

ここに

$$C_1 = \delta_e \frac{\cosh \gamma \cos \gamma}{\sinh^2 \gamma + \cos^2 \gamma} + \frac{1}{2\rho^2} \frac{m_{w2}'(x=\alpha L)}{EI_{w2}} \frac{\sinh \gamma \sin \gamma}{\sinh^2 \gamma + \cos^2 \gamma} \quad (5.1)$$

$$C_2 = \delta_e \frac{\sinh \gamma \sin \gamma}{\sinh^2 \gamma + \cos^2 \gamma} - \frac{1}{2\rho^2} \frac{m_{w2}'(x=\alpha L)}{EI_{w2}} \frac{\cosh \gamma \cos \gamma}{\sinh^2 \gamma + \cos^2 \gamma} \quad (5.2)$$

$$\gamma = \rho \left(\frac{1}{2} - \alpha \right) L \quad (5.3)$$

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{k_f}{EI_{w1}} + \frac{k_f}{2EI_{w2}} \right)^{1/4} \quad (5.4)$$

であつて、 $m_{w2}'(x=\alpha L)$ は initial な外力によつて船側外板に加わる曲げモーメントの縦通隔壁端における値である。また、 δ_e は縦通隔壁端における相対変位で、次のようにして求めることができる。すなわち、縦通隔壁に働く垂直方向の力の平衡条件として

$$\int_{\alpha L}^{(1-\alpha)L} w_{w1}'(x) dx + \int_{\alpha L}^{(1-\alpha)L} w_{w1}''(x) dx + 2 F_{w1} = 0$$

が成立しなければならないから、この式に

$$w_{w1}''(x) = -k_f \{ \delta_{w1}(x) - \delta_{w2}(x) \} \quad (6.1)$$

$$F_{w1} = -k_e \delta_e \quad (6.2)$$

を代入して整理すると

$$\delta_e = \frac{1}{1+2\lambda} \left\{ \frac{\rho}{k} \int_{\alpha L}^{(1-\alpha)L} w_{w1}'(x) dx - \frac{1}{2\rho^2} \frac{m_{w2}'(x=\alpha L)}{EI_{w2}} \right\} \quad (7)$$

をうる。ただし

$$\lambda = \frac{\rho k_e}{k_f} \quad (8)$$

である。

2.2 縦通隔壁 2 枚の場合

縦通隔壁が両船側からそれぞれ βB の位置に計 2 枚設けられている場合について考える (第 2 図参照) と, この場合も前と同様にして縦通隔壁 (パネル W-1) と船側外板 (パネル W-2) の相対変位を求めることができる。その結果の算式の形としては (4) 式と全く同様であつて, ただ (5.4) 式に対して

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{k_f}{EI_{w1}} + \frac{k_f}{EI_{w2}} \right)^{1/4} \quad (5.4')$$

とすればよい。

2.3 縦通隔壁 3 枚の場合

縦通隔壁が船体中心線および両船側からそれぞれ βB の位置に計 3 枚設けられている場合について考える (第 3 図参照)。この場合は, 中心線縦通隔壁 (パネル W-1) と wing の縦通隔壁 (パネル W-2) の間および wing の縦通隔壁と船側外板 (パネル W-3) の間にそれぞれ相対変位を生ずる。前者の相対変位に抵抗する横部材のパネ常数を $k_{f,1}$, $k_{e,1}$ 後者に対するパネ常数を $k_{f,2}$, $k_{e,2}$ とすると, パネル W-1, W-2 および W-3 に働く相対反力 $w_{w1}''(x)$, $w_{w2}''(x)$ および $w_{w3}''(x)$ はそれぞれ次のように表わすことができる。

$$w_{w1}''(x) = -k_{f,1} \{ \delta_{w1}(x) - \delta_{w2}(x) \} \quad (9.1)$$

$$w_{w2}''(x) = \frac{k_{f,1}}{2} \{ \delta_{w1}(x) - \delta_{w2}(x) \} - k_{f,2} \{ \delta_{w2}(x) - \delta_{w3}(x) \} \quad (9.2)$$

$$w_{w3}''(x) = k_{f,2} \{ \delta_{w2}(x) - \delta_{w3}(x) \} \quad (9.3)$$

ここに $\delta_{w1}(x)$, $\delta_{w2}(x)$ および $\delta_{w3}(x)$ はパネル W-1, W-2 および W-3 のそれぞれの撓みである。

前と同様にして, 相対変位 $\delta_{w1}(x) - \delta_{w2}(x)$ および $\delta_{w2}(x) - \delta_{w3}(x)$ に対する微分方程式を導くことができるが, これら両者は互に独立であると仮定すると, それらの微分方程式を比較的簡単に解くことができ, その解は積荷が船幅方向に一様であるときは, それぞれ近似的に次のように与えられる。

$$\delta_{w1}(x) - \delta_{w2}(x) = C_{11} \cosh \rho_1 \left(x - \frac{L}{2} \right) \cos \rho_1 \left(x - \frac{L}{2} \right) + C_{12} \sinh \rho_1 \left(x - \frac{L}{2} \right) \sin \rho_1 \left(x - \frac{L}{2} \right) \quad (10.1)$$

$$\delta_{w2}(x) - \delta_{w3}(x) = C_{21} \cosh \rho_2 \left(x - \frac{L}{2} \right) \cos \rho_2 \left(x - \frac{L}{2} \right) + C_{22} \sinh \rho_2 \left(x - \frac{L}{2} \right) \sin \rho_2 \left(x - \frac{L}{2} \right) \quad (10.2)$$

ここに

$$C_{11} = \delta_{e,1} \frac{\cos h \gamma_1 \cos \gamma_1}{\sin h^2 \gamma_1 + \cos^2 \gamma_1} \quad (11.1)$$

$$C_{12} = \delta_{e,1} \frac{\sin h \gamma_1 \sin \gamma_1}{\sin h^2 \gamma_1 + \cos^2 \gamma_1} \quad (11.2)$$

$$C_{21} = \delta_{e,2} \frac{\cos h \gamma_2 \cos \gamma_2}{\sin h^2 \gamma_2 + \cos^2 \gamma_2} + \frac{1}{2 \rho_2^2} \frac{m_{w3}'(x = \alpha L)}{EI_{w3}} \frac{\sin h \gamma_2 \sin \gamma_2}{\sin h^2 \gamma_2 + \cos^2 \gamma_2} \quad (11.3)$$

$$C_{22} = \delta_{e,2} \frac{\sin h \gamma_2 \sin \gamma_2}{\sin h^2 \gamma_2 + \cos^2 \gamma_2} - \frac{1}{2 \rho_2^2} \frac{m_{w3}'(x = \alpha L)}{EI_{w3}} \frac{\cos h \gamma_2 \cos \gamma_2}{\sin h^2 \gamma_2 + \cos^2 \gamma_2} \quad (11.4)$$

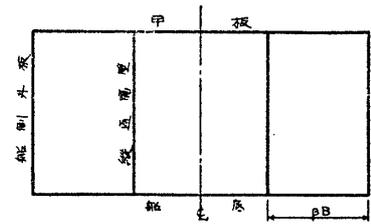
$$\gamma_1 = \rho_1 \left(\frac{1}{2} - \alpha \right) L \quad (11.5)$$

$$\gamma_2 = \rho_2 \left(\frac{1}{2} - \alpha \right) L \quad (11.6)$$

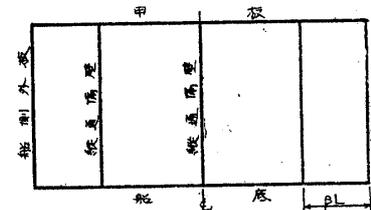
$$\rho_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{k_{f,1}}{EI_{w1}} + \frac{k_{f,1}}{2 EI_{w2}} \right)^{1/4} \quad (11.7)$$

$$\rho_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{k_{f,2}}{EI_{w2}} + \frac{k_{f,2}}{EI_{w3}} \right)^{1/4} \quad (11.8)$$

であつて, EI_{w1} , EI_{w2} および EI_{w3} はそれぞれパネル W-1, W-2 および W-3 の曲げ剛性である。また, $\delta_{e,1}$, $\delta_{e,2}$ はパネル W-1 および W-3 の垂直方向の力の平衡を考慮することにより, それぞれ次のように与えられる。



第 2 図 縦通隔壁 2 枚の場合の中央切断図



第 3 図 縦通隔壁 3 枚の場合の中央切断図

$$\delta_{e,1} = \frac{1}{1+2\lambda_1} \frac{\rho_1}{k_{f,1}} \int_{\alpha L}^{(1-\alpha)L} w_{w1}'(x) dx \quad (12.1)$$

$$\delta_{e,2} = -\frac{1}{1+2\lambda_2} \left\{ \frac{\rho_2}{k_{f,2}} \int_0^L w_{ws}'(x) dx + \frac{1}{2\rho_2^2} \frac{m_{ws}'(x=\alpha L)}{EI_{ws}} \right\} \quad (12.2)$$

ここに

$$\lambda_1 = \frac{\rho_1 k_{e,1}}{k_{f,1}} \quad (13.1)$$

$$\lambda_2 = \frac{\rho_2 k_{e,2}}{k_{f,2}} \quad (13.2)$$

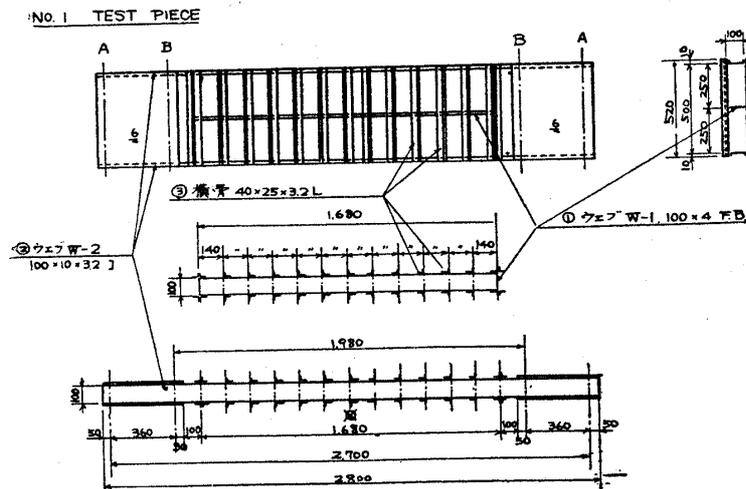
である。

3 荷重、剪断力および曲げモーメント

縦通隔壁と船側外板の間、もしくは縦通隔壁相互間の相対変位が上述のように求められると、それらの間に働く相対反力は (6.1), (6.2) 式, (9.1)~(9.3) 式等によつて求めることができ、従つて、それを用いて縦通隔壁および船側外板の外力系を前報に述べた方法に従つて求めることができる。

4 実験的考察

以上の解析結果を検討するため試験片を作製して実験を行なつた。前報で述べたように、油槽船の船体のような構造の場合は W-1 および W-2 等の外力系の曲げモーメントによる応力が、船底外板および甲板を shear lag 効果によつて互に伝達し合うから、shear lag 効果を無くしてそれらの曲げモーメント (従つて、それによる応力) を互に分離して計測できるような試験片とした。すなわち、試験片は第 4 図に示してあるように、縦通隔壁および船側外板に相当する各ウェブの上下を等間隔に配置した山形鋼で結合した骨組み構造である。試験片は縦通隔壁 1 枚、2 枚および 3 枚を有する場合にそれぞれ対応するように Test Piece No.1, No.2 および No.3 の



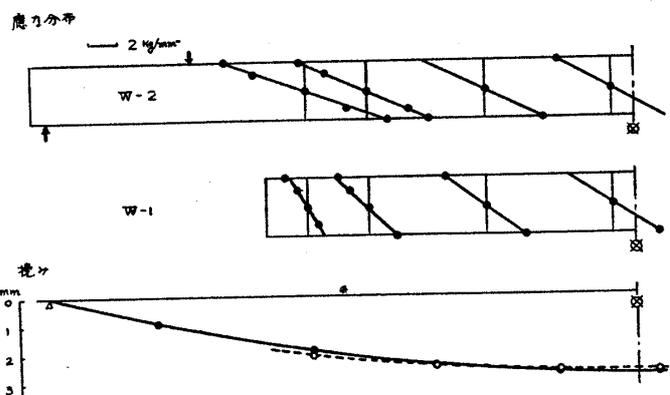
第 4 図 模型試験片

3 本とした。(第 4 図には Test Piece No.1 のみを示す)。

荷重は A および B 断面に負荷することによつて BB 間に一様曲げモーメントが得られるようにした。計測は抵抗線歪計による歪計測とダイアルゲージによる撓みの計測とである。

計測結果の 1 例として、Test Piece No.1 に一様曲げモーメントを与えた場合のウェブ W-1 および W-2 の応力分布および撓みの計測結果を第 5 図に示す。さらに、この場合の外力系を既に述べた方法に従つて求め、この計測結果と比較図示したものが第 6 図である。

これらの図から、ウェブ W-2 に加えられた一様曲げモーメントによつてウェブ W-2 に生ずる応力は試験片の中央に近づくに従つて次第に減少し、逆に、ウェブ W-1 に生ずる応力は次第に増加を示している。これは、これら撓みの計測結果からも分るように、それらの相対変位に基づく相互反力の影響によるものである。また、剪断力の分布はその構造物全体としては BB 間では



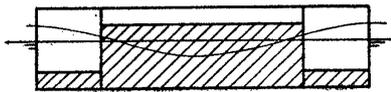
第 5 図 応力および撓みの計測結果 (No.1 Test Piece 一様曲げ)

零であるが、ウェブ W-1 についてみると図示のような内部反力に基づく剪断力が分布しており、ウェブ W-2 においてはそれと逆方向の剪断力が分布している。さらに、その積分値としての曲げモーメントの分布は計算と実験とがよく一致していると思なうと思われる。

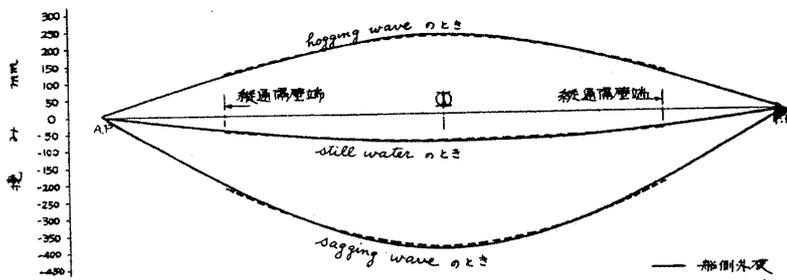
その他の実験結果についても著者の解析はほぼ実験的に満足されることが分つた。

5 箱型油槽船に対する数値計算例

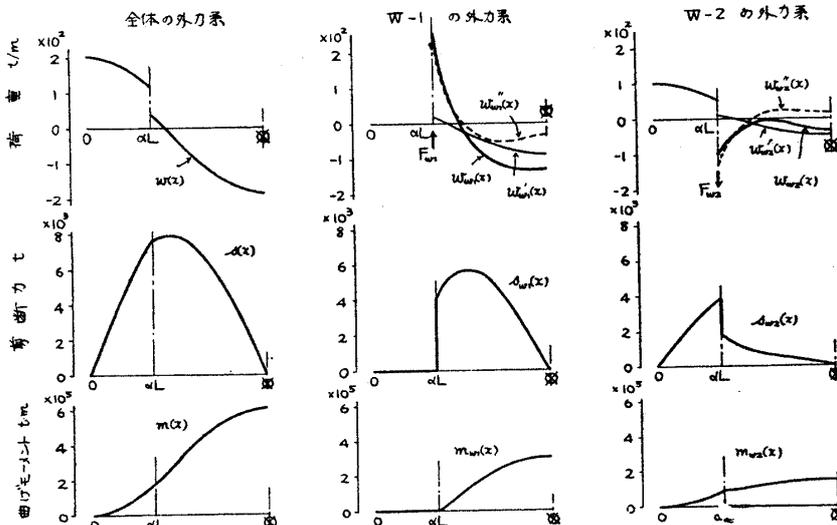
65,000 D. W. ton 型の箱型油槽船に第7図に示すような荷重が加わつた場合の相対変位および外力系を上述の方法に従つて計算した。この場



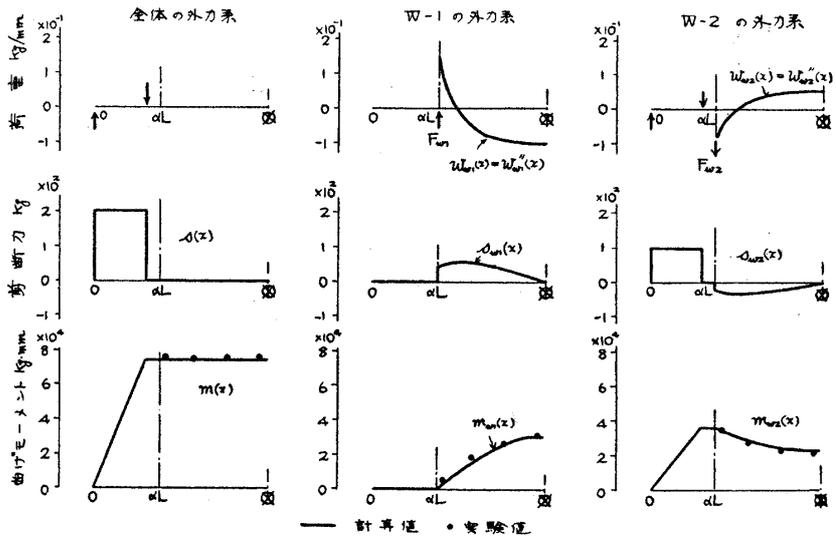
第7図 想定した箱型油槽船の荷重状態



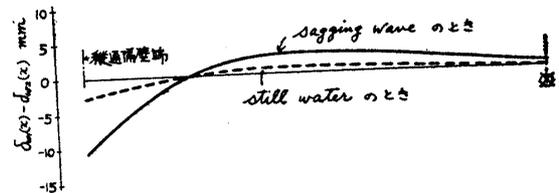
第9図 縦通隔壁1枚の場合の船側外板および縦通隔壁の撓み



第10図 縦通隔壁1枚の場合の外力系 (Sagging wave)



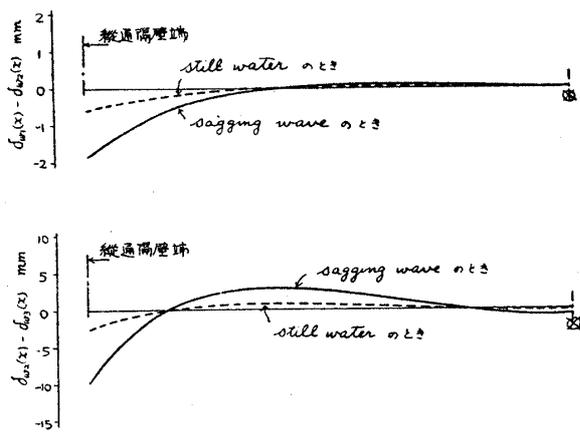
第6図 外力系の計算値と実験値との比較 (No.1 Test Piece 一様曲げ)



第8図 縦通隔壁1枚の場合の撓み差

合の荷重の大きさおよび縦通隔壁1枚の場合の箱型油槽船の諸元は前報と同様である。第8図はその相対変位を、第9図は船全体の撓みに対する関係をそれぞれ図示したものである。ただし第9図は船全体の撓み量に対し撓み差量を2倍にして示してある。第10図はこの場合の外力系の計算結果を図示したものである。同図は縦通隔壁の剪断力の負担率はかなり高いことを示している。

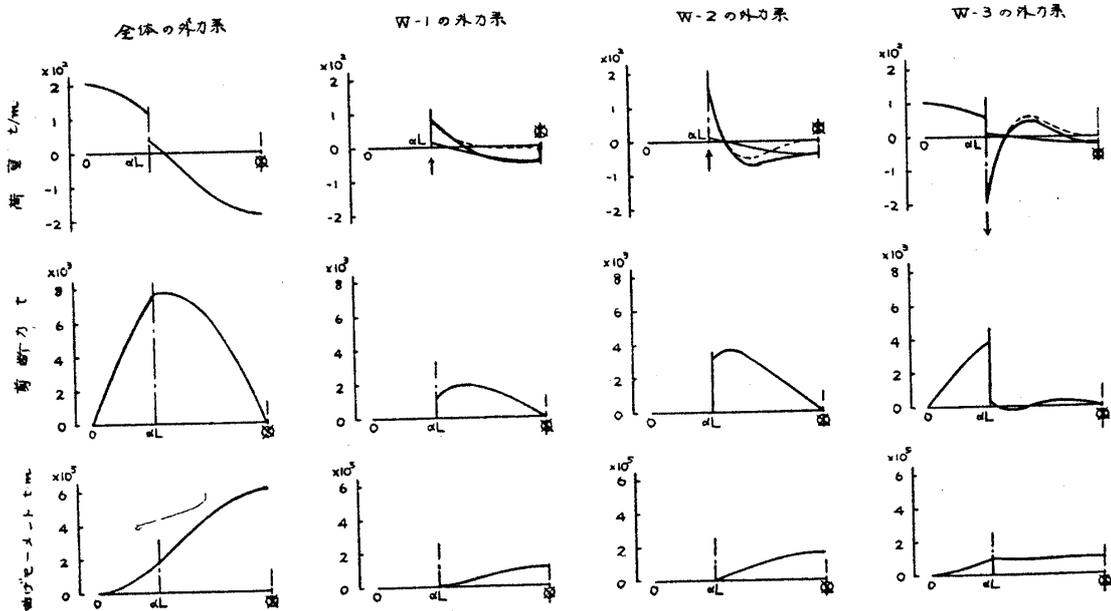
つぎに、縦通隔壁3枚の場合の計算結果を述べよう。この場合は $\beta=1/4$, $t_{w1}=t_{w2}=16\text{mm}$, $t_{w3}=32\text{mm}$, $t_{w1}'=t_{w2}'=25\text{mm}$, $t_{w3}'=42\text{mm}$ としたほかは、縦通隔壁1枚の場合と同様である。第11図はその相対変位を示す。これによると、船側外板とwingの縦通隔壁の間の相対変位はwingの縦通隔壁と中心線縦



第 11 図 縦通隔壁 3 枚の場合の相対変位

通隔壁との間の相対変位より大きい。第 12 図は外力系を图示したものである。この場合も、縦通隔壁の剪断力の負担率はかなり高いことを示しており、特に wing の縦通隔壁のそれは大きいことを示している。

以上は縦通隔壁が中央部 0.64L 間に亘る場合であるが、縦通隔壁を機関室内に延長した場合の効果を調べるために、縦通隔壁が中央部 0.8L 間に設けられ、船体のその他の構造や荷重状態は前と同様の場合について計算を行なった。第 13 図および第 14 図はそれぞれの相対変位および外力系である。これらの図を第 11 図および第 12 図とそれぞれ比較すると、縦通隔壁を機関室内に延長することは効果的であることが分かるが、しかし、縦通隔壁の剪断力についてはなお十分



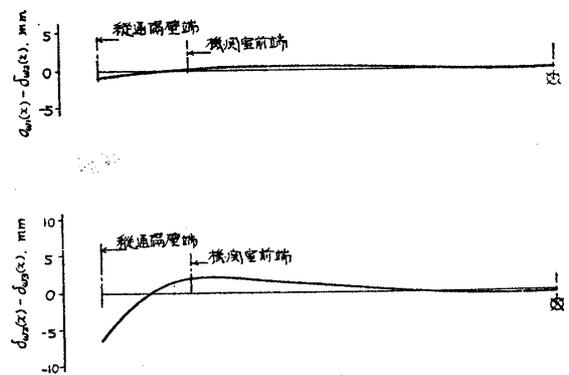
第 12 図 縦通隔壁 3 枚の場合の外力系 ($\beta=1/4$, Sagging wave)

な注意を払う必要があると思われる。

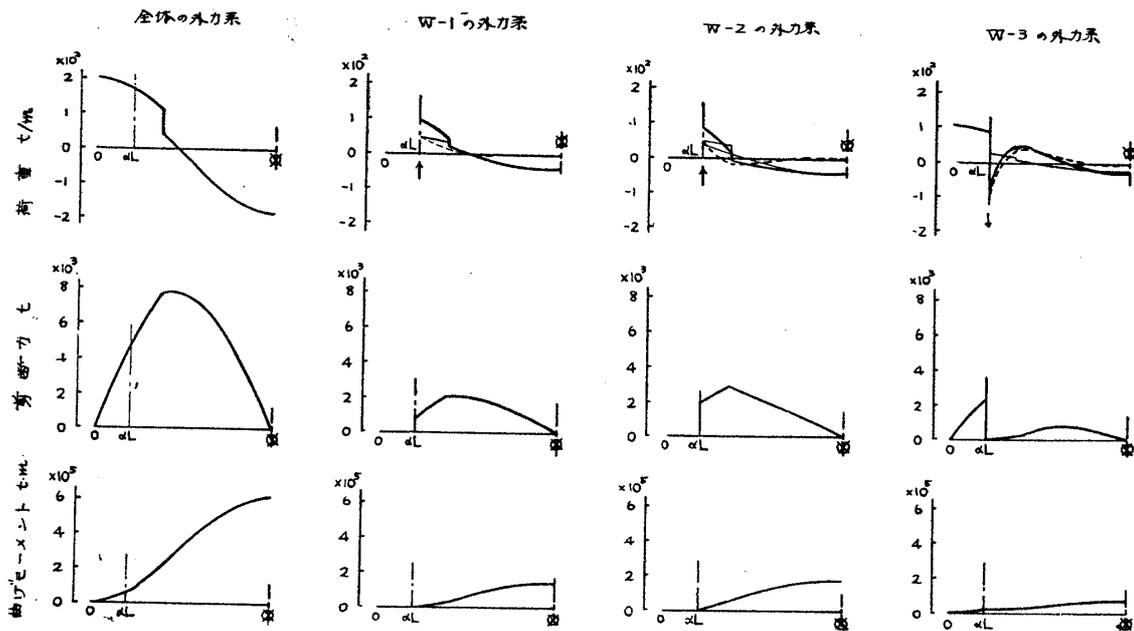
6 結 語

以上の解析によつて、油槽船の縦通隔壁に生ずる剪断力は外から作用する外力の外に、縦通隔壁や船側外板の縦曲げ剛性および相対変位に抵抗する横部材の剛性の船長方向の分布等によつて影響され、そして縦通隔壁端部付近の剪断力の負担率はかなり高いことを示しているので、この付近の構造には十分留意する必要があると思われる。

ここでとり上げた問題は、船側外板、縦通隔壁および横置隔壁から構成される格子構造の問題として考慮するのがより適切であるように思われるが、上述したような考え方によつても、ほぼその傾向を知ることができるように思われる。また、実際の船体構造は極めて複雑であるから縦曲げ剛性に関与する有効幅のとり方や横剛性の評価法等については、さらに検討する必要があると思われる。これらについては今後機会が許されれば調べたいと考えている。



第 13 図 縦通隔壁を機関室内に延長した場合の相対変位



第 14 図 縦通隔壁を機関室内に延長した場合の外力系 ($\beta=1/4$, Sagging wave)

なお、船体の各部に生ずる縦曲げ応力は、前述した各成分外力系の曲げモーメントによつて誘起された縦応力の重畳によつて与えられると考えられる。

最後に、本研究に対し御指導を賜つた東大・吉識教授，運研・秋田部長，東大・山本助教授，そのほかお世話になつた方々に対しまして厚くおん礼申し上げます。

文 献

- 1) 山越，縦隔壁の配置と剪断応力の分布について，日本海事協会合理化委員会資料第 4 号。
- 2) 守屋他，大型船における縦通隔壁の有効性に関する実験的研究，造船協会論文集第 107 号。
- 3) 田代，船体縦通材の有効性に関する研究，造船協会論文集第 106 号。 (以 上)