水密横隔壁付 Horizontal Girder の強度

正員 永 元 隆 一*   正員 井 土 敏*
 正員 小 沼 守*   中 山 美都里**

On the Strength of Horizontal Girder on Transverse Watertight Bulkhead

By Ryuichi Nagamoto, *Member*, Satoshi Izuchi, *Member*

Mamoru Konuma, *Member*, Midori Nakayama

Summary

Along with the recent tendency to the increase in size of oil tankers, the scantlings of hull structural members, especially primary supporting members, have become very large. Also, these members are subjected to great loads, and a considerably high stress may occur locally if the scantlings of the structure are not sufficient.

As one of the series of studies to cope with the increase in size of oil tankers, the authors try to investigate the strength of horizontal girders of a 120,000 DWT tanker by comparing the stress measured on an actual ship with the stress calculated by an electronic computer.

The results of stress analysis coincide considerably well with the stress measured on an actual ships, showing that the calculation method described below is fairly good.

This paper also discusses the strength of horizontal girders in various loading conditions, the effectiveness of center line vertical web and the effect of transverse rings neighboring watertight bulkheads on horizontal girders.

緒 言

近年 Tanker の大型化の傾向は著しく、これに伴って構造部材特に Primary Supporting Member の Scantling も非常に大きなものとなつてきている。横隔壁の Horizontal Girder もこの代表的な一例であるが、これら部材は負荷される荷重もまた大きく、ために構造の如何によつては局部的にかなり大きな応力が生ずる場合も考えられ、最近これが原因と思われる損傷例も 2, 3 報告されているので、かなり精度ある応力解析並びに応力計算法が必要とされるに至つたと考えられる。本報告は大型化に対処する研究の一環として 12 万重量トン Tanker の水圧試験時を利用して水密横隔壁付 Horizontal Girder の応力計測を行ない、且つ次章以下に示す応力解析計算との比較を行なつてその検討結果をとりまとめたものである。

また応力解析計算の結果と実測値は極めて良好な一致を示し計算法の妥当性の確証を得たので、種々の荷重状態における Horizontal Girder の強度、Centre Line Vertical Web の有効度、Horizontal Girder と結合する横隔壁前後の Transverse Ring と Horizontal Girder との相持ち効果等について併せ検討考察を行なつた。

1 強度計算法

1-1 基本式

イ) Horizontal Girder の各部材を変断面梁として取扱い曲げと剪断を考慮した撓角撓度法¹⁾により基本式を導いた。Horizontal Girder の Arm 部 (Fig.1-2 参照) も夫々一つの部材と考え、また横隔壁付 Vertical Web 並びに Horizontal Girder と結合する Transverse Ring の各部材についても同様に取扱い同じ基本式を適用す

* 三菱重工業株式会社 長崎造船所

** 三菱重工業株式会社 長崎研究所

ることとする。

部材端モーメント

$$M_{AB} = \frac{\alpha_0 \alpha_2 - \beta_0 \alpha_3 + \alpha_3 \theta_A + \alpha_2 \theta_B - (\alpha_2 + \alpha_3)(\delta_B - \delta_A)/l}{\alpha_1 \alpha_3 - \alpha_2^2}$$

$$M_{BA} = \frac{\alpha_0 \alpha_1 - \beta_0 \alpha_2 + \alpha_2 \theta_A + \alpha_1 \theta_B - (\alpha_1 + \alpha_2)(\delta_B - \delta_A)/l}{\alpha_1 \alpha_3 - \alpha_2^2}$$

部材端剪断力

$$F_{AB} = -\frac{(M_{AB} + M_{BA})}{l} + R_A$$

$$F_{BA} = -\frac{(M_{AB} + M_{BA})}{l} - R_B$$

軸力

$$N = \frac{A_N E (\delta_{NB} - \delta_{NA})}{l}$$

ただし

$$\alpha_1 = \frac{1}{EI^2} \int_0^l \frac{(l-x)^2}{I} dx + \frac{1}{Gl^2} \int_0^l \frac{dx}{A}$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{EI^2} \int_0^l \frac{(l-x)x}{I} dx - \frac{1}{Gl^2} \int_0^l \frac{dx}{A}$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{EI^2} \int_0^l \frac{x^2}{I} dx + \frac{1}{Gl^2} \int_0^l \frac{dx}{A}$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{EI} \int_0^l \frac{M_0 x}{I} dx + \frac{1}{Gl} \int_0^l \frac{S_0}{A} dx$$

$$\beta_0 = \frac{1}{EI} \int_0^l \frac{M_0 (l-x)}{I} dx - \frac{1}{Gl} \int_0^l \frac{S_0}{A} dx$$

I : 部材の断面慣性モーメント

A : 部材の剪断有効面積

M_0 : 外力による部材端曲げモーメント

S_0 : 外力による部材端剪断力

l : 部材長さ

δ_A, δ_B : 変位 (撓度)

R_A, R_B : 部材間の荷重による反力

δ_{NA}, δ_{NB} : 軸方向の変位

A_N : 軸力に有効な断面積

ロ) 各部材の結合節点では相互反力が働いてこれらが balance するものとして節点方程式を、また力の balance から層方程式を導いたがこれらの詳細については一般のラーメン計算と同様なので省略する。

ハ) 隅角部の応力は一部有限要素法によつて検討したが、これによる計算値は楔理論に基く計算値と良い一致を示したので、本計算は Osgood の楔理論²⁾によることにした。なお楔の取り方は山越の方法³⁾によつた。

1-2 計算モデル

計算は電子計算機で行なうこととし一般性を持たせた Program とするため Fig.1-1 に示すような model について計算式を導いた。すなわち最大 6 層の Horizontal Girder が Wing および Centre Tank 内の片舷各 1 条の Side Vertical Web と Centre Line Vertical Web によつて上下に結合され、また横隔壁に隣接する Transverse Ring は Wing Tank に 3 本の Strut を有し、Centre Line Girder 並びに Centre および Wing Tank に片舷各 1 本の Side Girder で前後に結合された立体的 model を想定しているが、あらかじめ計算機に指示を与えることにより適宜不要部材を除く Program としているので、本報告の場合は Fig.1-2 の model について計算したことになる。なお板および骨材の剛性は大骨材に比べはるかに小さいのでこれは無視することとし、また本計算の場合 Corrugated Bulkhead なので Bulkhead Plate の有効幅を 0 とし大骨材の剛性に算入しないことにした。

Fig. 1-1 Structural Model

Fig. 1-2 Schematic Model of 120,000 D/W ton Tanker

上述の如く Transverse Ring を前後に結合した model により計算する場合を以下完全立体計算と称しこれを解析の基本としたが、Transverse Ring との結合を解き Horizontal Girder Arm の Transverse Ring との結合点に支持点を設けた場合、さらに簡略化して Vertical Web による上下方向の結合を解いてこの位置に固定支点を設け、Horizontal Girder を平面的に取扱った場合についても比較のため計算を行ない以下簡単のためにそれぞれ簡易立体計算、平面計算と呼ぶことにした。

1-3 境界条件

前記の三つの計算法について境界条件を第1表に示す。同表中の略図は Horizontal Girder 一層を Schematic に平面的に示したものである。

第1表 計算モデルの境界条件

項目	計算法	完全立体	簡易立体	平面
計算モデル				
A, C 点での条件		撓角及び撓度あり	撓角及び撓度あり	撓角及び撓度あり
E 点での条件		撓角なし、撓度あり	撓角なし、撓度あり	撓角及び撓度なし (固定)
F, G, H, I 点での条件		撓角あり (回転自由)、撓度あり	撓角あり、撓度なし (単純支持)	撓角あり、撓度なし (単純支持)
Long Space (HG Arm) にかかる荷重		1 Long Space の荷重をかける	1 Long Space の荷重をかける	なし
Vertical Web との結合 (E 点)		Vertical Web と結合	Vertical Web と結合	なし
Transverse Ring との結合 (F, G, H, I 点)		Transverse Ring と結合	なし ただし F, G, H, I 点に強制変位を与え得る	なし
Vertical Web の End (Bottom & Deck) での条件		強制変位及び強制角変位を与え得る	強制変位及び強制角変位を与え得る	

2 実船試験

2-1 対象船要目及び荷重状態

当社長崎造船所建造の Centre Line Girder を有する NK Class 12 万トン型 Tanker ($L \times B \times D \times d$: 256.0 m $\times$ 42.5 m $\times$ 22.0 m $\times$ 15.8 m, 載荷重量 123,000 トン) の水試時を利用して計測を実施した。

Fig. 2-1 No. 2 Horizontal Girder

Fig. 2-2 Vertical web on T. W. T. B.

Fig. 2-3 Typical Section of Trans. Ring & T. W. T. B.

Fig. 2-4 Ballast in Testing Condition

横隔壁付 Horizontal Girder は 3 層で Vertical Corrugated Bulkhead のため Horizontal Girder が Bulkhead plate を前後にはさんだ形状になっている。Horizontal Girder の形状を Fig. 2-1 に、Centre Line Vertical Web の形状を Fig. 2-2 に、横隔壁および Transverse Ring の midship における断面形状を Fig. 2-3 に示している。

応力計測は No. 2 Centre Tank に漲水した Test No. 1 の状態と、それからさらに No. 3 Wing Tank に漲水した Test No. 2 の状態について実施した。こ

れら Ballast 配置を Fig. 2-4 に示す。また載荷状態を第 2 表に示す。

2-2 実船試験結果

応力計測は Fr. No. 66 および 74 (Fig. 2-4 参照) の横隔壁について行なつたが何れも同様の結果が得られたので代表的例を示すことにし、Fr. No. 74 の横隔壁付 No. 2 Horizontal Girder の Face Plate の曲げ応力および Web Plate の剪断応力の計測結果を Fig. 2-5~Fig. 2-9 に示す。曲げ応力は Face Plate を基線にして圧縮応力を Web Plate 内に (図中記号 $\ominus$)、引張応力を外側 (図中記号 $\oplus$) に描いた。剪断応力も Face

第2表 実船試験時の載荷状態

TEST NO.		1			2		
LOADING		0 %	65 %	100 %	0 %	69 %	100 %
TEST HEAD	NO.2 C. TANK m	0	14.82	22.88	20.92	20.92	19.48
	NO.3 W. TANK m	0	0	0	0	15.63	22.60
	d_F m	3.20	5.00	6.50	6.09	6.40	7.60
	d_{ϕ} m	4.45	5.45	6.07	5.70	6.45	7.03
	d_A m	5.60	5.85	5.52	5.25	6.45	6.40

Fig. 2-5 Bending stress-Test No.1, 65% Loading

Fig. 2-6 Bending stress-Test No.1, 100% Loading

Plate を基線にして描いた。(剪断力の符号は図中記号に示す通りである。)

これら計測は No.2 Centre Tank および No.3 Wing Tank に夫々3回に分けて漲水する際各段階について実施したもので、漲水が2日にわたつたため Test No.1 では No.2 Centre Tank 漲水前、Test No.2 では No.2 Centre Tank に 20.92m 漲水し No.3 Wing Tank が空の状態を零点にとつている。

2-3 考 察

第1章で述べた計算法による計算値を Fig. 2-5~Fig. 2-9 に併記した。すなわち実線は完全立体、破線は簡易立体、鎖線は平面計算による値である。なお Test No.2 の計算値は計測値に対応させるため No.2 Centre Tank 漲水時を Base として修正を行なつている。実験値と比較すれば

- (1) 完全立体計算は何れの Test の場合も極めて良い一致を示しているが計算値が $1\sim 2\text{ kg/mm}^2$ 大きい場合もある。

Fig. 2-7 Bending Stress-Test No. 2, 69% Loading

Fig. 2-8 Bending Stress-Test No. 2, 100% Loading

Fig. 2-9 Shearing Stress-Test No. 1 & Test No. 2

(2) 簡易計算は千鳥漲水 (Test No. 2) の場合 Wing Tank 内の計測値とよく一致するが (Fig. 2-7, 2-8)

Centre Tank 漲水 (Test No. 1) の場合は傾向的にも多少異なっており余り良く合っていない。

(3) 平面計算は (2) の簡易計算とはほぼ同じ傾向であるが計算精度はさらに若干悪い。

以上 Horizontal Girder の各部応力は本完全立体計算で十分精度ある解析が行なえんと考えてよいであろう。

また (2), (3) から多少の誤差はあるが簡易立体または平面計算で概略検討することも可能である。

3 Horizontal Girder の強度

前章で実船計測応力と計算値との比較を行ない計算法の妥当性を確認したので、完全立体計算により横隔壁付 Horizontal Girder の強度について 2, 3 検討を行なった。計算対象船は応力計測を実施した前掲 Tanker である。

3-1 載荷状態

Wing Tank および Centre Tank に夫々単独で漲水する場合および千鳥に漲水する場合を想定した。水頭は何れの場合も Deck Side Line 上 2.45m とした。またその場合の喫水は 3.6m とした。

3-2 考察

No.2 Horizontal Girder の応力を Fig.3-1 および Fig.3-2 に示す。何れも実線は Wing Tank 水試、破線は Centre Tank 水試、鎖線は千鳥の水試状態の場合である。これから大凡次のような傾向がわかる。

Fig.3-1 Bending Stress in Structural Test

Fig.3-2 Shearing Stress in Structural Test

- (1) 当然のことながら千鳥水試は Wing Tank と Centre Tank の水試状態の superpose なので Horizontal Girder の強度上最も severe になる。以下の応力値は千鳥水試の場合である。
- (2) Wing Tank 平行部の曲げ応力は約 17 kg/mm^2 で Wing Tank 水試の場合に比べると約 20% 増加する。
- (3) Wing Tank の縦隔壁側隅角部の曲げ応力は約 25 kg/mm^2 で、Wing Tank 水試の場合の約 2 倍になる。
- (4) Centre Tank 平行部の曲げ応力は約 10 kg/mm^2 で Centre Tank 水試の場合の約 2 倍になる。

- (5) Wing Tank 平行部の剪断応力は約 10 kg/mm^2 で Wing Tank 水試の場合に比べると約 10% 増加している。
- (6) 縦隔壁側 Horizontal Girder Arm の Web の剪断応力は最大約 15 kg/mm^2 になり Centre Tank および Wing Tank 水試の場合に比べると夫々 1.5 倍, 2.8 倍になっている。
- (7) Centre Tank 平行部の剪断応力は約 9 kg/mm^2 で Centre Tank 水試の場合より約 10% 増加している。
- (8) Centre Line Vertical Web はかなり有効に Horizontal Girder を支持しており, Tank 中央部の Transverse Ring の Bottom Transverse in Centre Tank に比べ Centre Tank の Horizontal Girder は強度上比較的楽な状態にあるといえる。逆に Centre Line Vertical Web はかなり荷重を分担することになるが, 今回は工程の都合から十分な計測ができなかつたためこの強度に関する考察は省略するが, 設計に当つてはこの点十分な配慮が必要であると考えられる。
- (9) 以上 No.2 Horizontal Girder について述べたが, No.1 および No.3 Horizontal Girder でも同様の傾向を示しており, またこれらの応力もほぼ同程度である。

4 その他の検討結果

Horizontal Girder の強度と共に Transverse Ring の応力や撓みについて 2, 3 検討を行なつたので併せて報告する。

4-1 Transverse Ring の水平方向の撓み

Tanker の立体強度計算⁴⁾で解析された Transverse Ring は Tank のほぼ中央にあつて Horizontal Girder の影響を受けない一般的な場合について詳細に考察しているが, 横隔壁前後の Transverse Ring は Horizontal Girder のために撓みが拘束され応力状態も変化していると考えられる。本章では Horizontal Girder と結合した Transverse Ring と, Horizontal Girder との結合を解いた Transverse Ring 単独の場合について同一荷重状態で主として撓みについて比較検討を行なつた。Fig. 4-1 は Test No.1, Fig. 4-2 は Test No.2 の夫々 100% 載荷状態における横隔壁の前 (Fr. No.75) および後 (Fr. No.73) の Transverse Ring の撓みを示している。同図によれば

Fig. 4-1 Horizontal Deflection of Trans. Ring-Test No.1, 100% Loading

Fig. 4-2 Horizontal Deflection of Trans. Ring-Test No.2, 100% Loading

- (1) Horizontal Girder を考慮した場合の Test No.1 における Fr. No.75 の Vertical Web on Longitudinal Bulkhead (以下 Vert. Web on L.B^{HD} と略称する) の最大撓みは 4~5m/m すなわち約 40% 減少する。
- (2) Test No.2 でも Fr. No.75 の最大撓みはほぼ 40% 減少している。
- (3) Test No.1 における Fr. No.73 の撓みの減少は小さいが Horizontal Girder の影響によつて撓みの

方向が変化することを示している。

(4) Test No.2 における Fr. No.73 の最大撓みは約 30% 減少する。

したがって Transverse Ring の各部応力は極く一部を除き全般的に Horizontal Girder の影響によつて減少、緩和される傾向にあることを示している。例えば Vert. Web on L.B^{HD} の上部の剪断応力は Horizontal Girder との結合を解いた場合より約 2 kg/mm^2 減少するが、これは実船計測応力値とよい一致を示している。

4-2 Horizontal Girder に結合する Transverse Ring の Strut の効果

本船の場合 Wing Tank に 2 本の Strut があり、その有効性は Fig.4-2 の Transverse Ring の変形からもうかがえるが、さらにその有効度を調べるために水密横隔壁に隣接する Transverse Ring から Strut を取除いた場合の Transverse Ring 自体および Horizontal Girder の強度について Test No.2 の載荷状態で比較検討した。この場合 strut を除いても Transverse Ring の残りの各部材寸法は不変であるとした。Fr. No.73 および 75 の Transverse Ring の撓みを Fig.4-3 に示す。これによれば

- (1) Fr. No.75 (前側) の Transverse Ring の Vert. Web on L.B^{HD} の撓みは Strut がある場合に比べ最大 2.5 m/m 、ほぼ 45% 増加している。
- (2) Side Shell 側の撓みは約 3 m/m で最大約 2.5 m/m 減少している。
- (3) Fr. No.73 (後側) では Wing Tank に載荷のため大幅に撓み、Strut がある場合の 7~8 倍に達している。(外板側で約 17 m/m 、縦通隔壁側で約 14 m/m の最大撓みを生じている。)

つぎに Fr. No.75 および Fr. No.73 の Transverse Ring の応力状態を Fig.4-4, Fig.4-5 に示す。Face Plate の曲げ応力は Face Plate を基線にして Web Plate 内に圧縮応力を、外側に引張応力を描いている。また剪断応力は中性軸を基線にして描いている。同図によれば

- (1) Fr. No.75 の Vert. Web on L.B^{HD} の曲げ応力は最大 10 kg/mm^2 で Strut がある場合の約 1.3 倍

Fig.4-3 Influence of Strut on the Deflection of Trans. Ring

Fig.4-4 Influence of Strut on the Stress Distribution in Trans. Ring (Fr. No. 75)

Fig.4-5 Influence of Strut on the Stress Distribution in Trans. Ring (Fr. No. 73)

である。

- (2) Side Transverse の応力はほとんど零になっている。
- (3) Fr. No.73 の Vert. Web on L.B^{HD} の曲げ応力は最大 18 kg/mm^2 、Side Transverse では最大 20 kg/mm^2 で、夫々 Strut がある場合の約 2.3 倍、2.5 倍である。
- (4) Lower Vert. Web on L.B^{HD} の剪断応力も増加し、特に Fr. No.73 では最大 10 kg/mm^2 になっている。

これからみれば No.2 Test の载荷状態で strut を取除けば Transverse Ring の一部の部材応力はかなり大輻に増加するが、しかし懸念されるような過大な応力は生じていないことがわかる。

次にこの状態の Horizontal Girder の応力を Fig. 4-6 に示す。これによれば Strut を取除いた場合

Fig. 4-6 Influence of Strut on the Stress Distribution in Horizontal Girder

- (1) Wing Tank, Centre Tank 共に平行部の曲げ応力は小さくなる。
- (2) 隅角部の曲げ応力は一般に Face Plate の圧縮側が減少し、引張側が増加する。
- (3) Wing Tank に荷重がない場合の Horizontal Girder Arm の剪断応力は殆んど変化しないが、漲水 Tank 側の Arm では $5 \sim 6 \text{ kg/mm}^2$ 大きくなり、最大応力は約 15 kg/mm^2 になっている。

従つて Strut を取除いた場合は Arm の強度が特に重要になると考えられる。

4-1, 4-2 の検討から水密横隔壁付 Horizontal Girder 骨組構造とこれに結合する横隔壁前後の Transverse Ring の相持ち効果はかなり認められる。しかしながら Transverse Ring の強度に対する Strut の効果はこの場合でも非常に大であるといえることができる。

結 言

水密横隔壁付 Horizontal Girder の強度検討のために応力解析計算法の確立を試み以下の検討を行なつた。

- I. 12 万トン型大型 Tanker の実船試験解析
- II. 各種载荷状態における Horizontal Girder の強度検討
- III. Horizontal Girder に結合する Transverse Ring の強度検討

これらの検討の結果次のことが明らかになつた。

- (1) 完全立体計算の精度はかなり満足すべきものと考えられる。
- (2) 概略の強度検討を行なう場合は簡易計算法による検討も可能である。
- (3) 当然のことながら Horizontal Girder の強度上最も severe になるのは千鳥水圧試験状態で、Wing および Centre Tank 単独水試の応力状態に比べると最大 2 倍程度の増加を示している。
- (4) Centre Line Vertical Web は Horizontal Girder を極めて有効に支持し Centre Tank の Horizontal Girder の強度に十分寄与している。
- (5) Horizontal Girder に結合する水密横隔壁前後の Transverse Ring の Vert. Web on L.B^{HD} のたわ

みは一般の Transverse Ring に比べて 30~40% 減少する。

- (6) 水密横隔壁前後の Transverse Ring から Strut を取除くと載荷状態にある Wing Tank の Vert. Web on L.B^{HD} と Side Transverse の撓みはかなり大きく、この部材の応力は2倍程度増加する。Centre Tank 載荷状態でも Vert. Web on L.B^{HD} の撓みおよび応力も若干増加する。しかし懸念されるような過大な応力は生じない。これは(5)にも述べた Horizontal Girder と Transverse Ring の相持ち効果によるものと考えられる。
- (7) Horizontal Girder Arm 部構造は特に隅角部の強度に影響を与え、また前記相持ち効果もあり適当な配慮が必要である。

終りに臨み本研究に対し有益なご助言を賜わった九州大学山越教授に深く感謝致します。また本研究の実施に当り助力を戴いた当社長崎造船所岡部技師長に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 岡部利正他：WING TANK 立体格子構造計算について，造船協会論文集，第106号
  - 2) 山口勇男：船体横強度計算法について，造船協会論文集，第109号
  - 3) 山越道郎：Corner 部への Wedge Theory の適用，SR 83 部会トランスバースリングワーキンググループ資料 T-48 (1967)
  - 4) M. Mori & others：On the Strength of Oil Tankers，造船協会論文集，第121号
-