

(昭和 42 年 5 月造船協会春季講演会において講演)

新造青函連絡船の進水時強度試験

正員 白石 隆 義*

Strength of Newly Built "Seikan" Train Ferries Tested
on Their Launching

By Takayoshi Shiraishi, Member

Summary

Measured stresses and deflections are compared with calculated ones. Method to calculate the correct bending moment at lift by the stern, considering the effect of inertia force of virtual mass, is established. The values of virtual mass coefficient k_w' lied between 2.2~3.0. The contributions of the super structures to the longitudinal strength and rigidity are discussed. Strength of stress-concentrated parts at double bottom is examined and the parts are proved to be safe from fatigue failure.

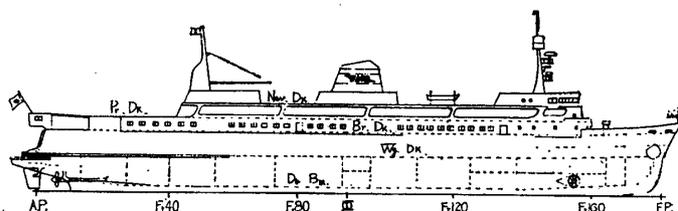
1 ま え が き

国鉄は昭和 38 年以来順次新造してきた 7 隻の青函連絡船のうち 4 隻について進水時を利用した強度試験を実施した。その主な目的は次の通りである。

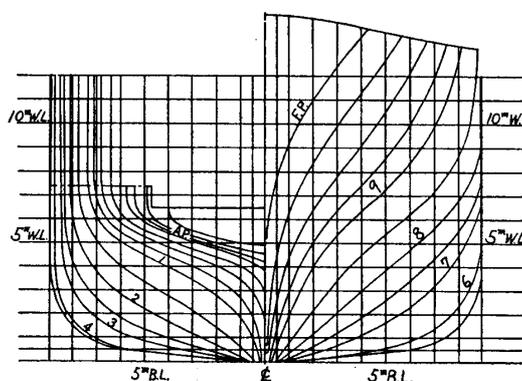
- (1) 縦曲げに対する強度および剛性を把握する。
- (2) これら強度あるいは剛性に対する上層甲板の有効性を検討する。

第 1 表 新造青函連絡船の
主要要目

全 長 LoA	132.0 m	
垂線間長 Lpp	123.0 m	
巾 (型)	17.9 m	
深 さ	7.2 m	
計画吃水	5.2 m	
総トン数	8,300 t	
C_b	0.542	
C_m	0.885	
C_w	0.782	
航海速力	18.2 Kn	
貨車搭載量	74 換算 48 両	
主機出力	1,600 PS x 2 基	
推進器	可変ピッチ	
バウスラスト出力	1,000 PS	
旅客定員	1 等	330 人
	2 等	870 人
	計	1,200 人
運航乗員	54 人	



第 1 図 新造青函連絡船の側面概略配置図



第 2 図 新造青函連絡船の正面線図

原稿受付 昭和 42 年 1 月 10 日

* 鉄道技術研究所 (Railway Technical Research Institute)

- (3) 曲げモーメントと曲げ応力との関係を極力正確に把握して、就航中の曲げモーメント頻度を曲げ応力頻度より求めるための資料を得る。
- (4) (3)の目的のために進水時特に船尾浮揚時の曲げモーメントを船体および付加質量の慣性を考えた動的釣合条件より求める方法を確立する。
- (5) 局所的な強度上の問題点について検討する。

本報告は、これらの試験の結果およびそれらに関する考察について記すものである。なお、試験に用いたたわみを始めとする各種の量の動的測定法は既報の通りである⁽¹⁾。

第2表 試験連絡船の進水諸元

船名	津軽(T)丸	八甲田(H)丸	松前(Mm)丸	摩周(Ms)丸
進水期日	S 38.11.15	S 39.4.15	S 39.7.23	S 40.3.18
進水場所	浦賀重工・浦賀第5船台	三菱重工・神戸第3船台	函館 Dock 函館第4船台	三菱重工・神戸第3船台
進水質量(総重量)	3,700 ^t (70°)	3,590 ^t (173°)	3,673 ^t (95°)	3,803 ^t (126°)
固定台長さ(傾斜)	144.9 ^m	142.5 ^m	150.3 ^m	142.5 ^m
滑走台長さ(傾斜)	93.0 ^m	97.3 ^m	99.4 ^m	97.3 ^m
滑走台中	1.000 ^m	1.220 ^m	0.800 ^m	1.220 ^m
滑走台中心間距離	4.50 ^m	5.60 ^m	5.60 ^m	5.60 ^m
オーバーハング	前部	18.0 ^m	14.6 ^m	9.7 ^m
	後部	12.0 ^m	20.1 ^m	13.9 ^m
固定台キャンバー	0.900 ^m	0.631 ^m	0.550 ^m	0.631 ^m
固定台傾斜	前部	38/1000	39/1000	39/1000
	後部	87/1000	73/1000	64/1000
	平均	63/1000	56/1000	52/1000
	船体中央	53/1000	51/1000	48/1000 [*]
滑走台平均傾斜	54/1000	51/1000	47/1000	51/1000
竜骨傾斜	50/1000	46/1000	43/1000	46/1000
進水架前噴嘴最大質量	970 ^t	830 ^t	790 ^t	786 ^t
滑走媒体	ハット	鋼球	鋼球	鋼球
完全浮揚後吃水	船	1.68 ^m	2.56 ^m	1.95 ^m
	頭	3.36 ^m	3.32 ^m	3.41 ^m
	尾	4.96 ^m	4.08 ^m	4.79 ^m

第3表 測定項目および測定位置

船名	T丸	H丸	Mm丸	Ms丸
吃水 (Fr. No)	AP. 10, 20, 30, 40, 55, 75, 95, 115.	AP. 10, 25, 40, 55, 70, 85, 100, 105, 110, 115, 120.	同 左	AP. 10, 25, 40, 55, 70, 85, 100, 115, 130.
進水速度および走行距離	ヒヤノ線法	ストップウオッチ法	接点法	ストップウオッチ法
船底水圧	AP (E) Fr 34 (Eより0.9m) Fr 47 (Eより1.55m)	/	/	AP (Eより0.4m) Fr 52 (Eより0.8m) Fr 89 (Eより1.6m)
船尾垂直加速度	AP (Nav. Dk)	Fr 9 (R. Dk)	Fr 61 (R. Dk)	Fr 11 (W. Dk)
断面内応力	Nav. Dk	3 変	1 変	1 変
	R. Dk	3 変	2 変	5 変
	Br. Dk	3 変	2 変	2 変
	W. Dk	3 変	2 変	1 変
D. B.	D. B.	3 変	1 変	2 変
	D. B.	3 変	1 変	1 変
局部応力	R. Dk 縦方向応力	/	6 変	6 変
	水平波動型補剛材応力	F. 130 2 変 (R. Dk, Br. Dk)	/	/
	D. B. 前部隅角応力	/	/	Fr 97 1 変
たわみ	Fr 15 & Fr 163 測り Fr 87 測り	同 左	同 左	Fr 97 8 変

2 試験の概要

試験を実施した連絡船は津軽丸 (T丸), 八甲田丸 (H丸), 松前丸 (Mm丸) および摩周丸 (Ms丸) である (以後カッコ内の略称を用いる)。新造青函連絡船はこれら4隻の他に大雪丸, 羊蹄丸および十和田丸がありすべてほぼ同一の船型, 配置および構造を持つ。その主要要目を第1表に, 側面の概略配置図を第1図に正面線図を第2図に示す。

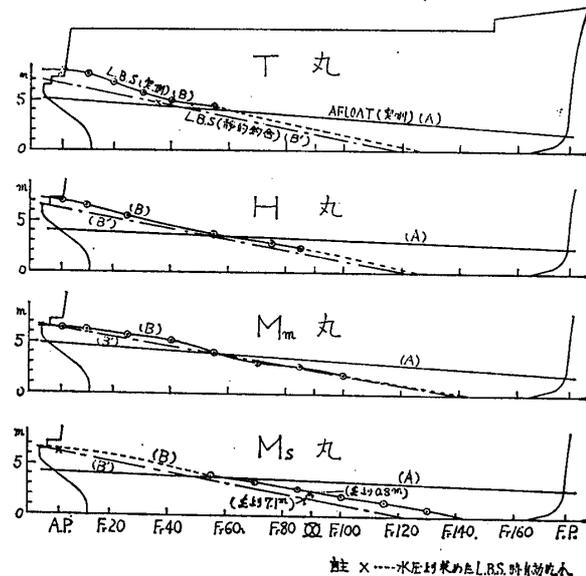
試験の期日, 場所および主な進水諸元を第2表に示す。また測定項目および測定位置の概要を第3表に示す。なお, 進水直前の船体工事の進捗状況は各船ごとに僅かずつ異なっていたが, ほぼ次の通りであった。

(1) 航海甲板までの船体ブロックの取付溶接はほぼ完了していた。(2) 船楼甲板以下のひずみ取り作業はほぼ完了していた。(3) 遊歩甲板のひずみ取りは荒ひずみが取れた程度の船もあつた。(4) 船海甲板や遊歩甲板室壁のひずみ取りは大部分未了であつた。

3 試験の結果

3.1 吃水および船底水圧

船尾が浮揚する途中, $F_r 105^{1/2}$ 断面における曲げ応力が最大になつた瞬間 {以後船尾浮揚時 (LBS 時) という} および完全浮揚時 (A_{fl} 時) の喫水を第3図に示す。同図には LBS 時と A_{fl} 時の船底水圧の差の測定値より水頭を求め (海水比重を 1.025 とす), これを A_{fl} 時の喫水に加えた値を×印で点置した。さらに同図には静的釣合条件から求めた LBS 時の喫水を鎖線で示した。第3図を一見するだけで静的釣合から求めた喫水は実際とはかなり違つており, これから LBS 時の曲げモーメントを算出するのは適当でないことがわかる。同図の LBS 時喫水実測曲線中の点線部分は測定しなかつたか, あるいは失敗した部分で, 水圧計の測定値あるいは進水台傾斜などから推定したものである。



第3図 吃水および船底水圧測定結果

3.2 船尾浮揚時の船尾垂直加速度, 進水速度および走行距離

これらの測定値を第4表に示す。同表中 () を付した値は測定法がやや不適當であつたか (加速度), 同時測定でなかつた (走行距離) ため若干正確さが欠けると思われるものである。

3.3 曲げ応力分布

イ) 断面内分布

T丸, H丸および Mm丸の $F_r 105^{1/2}$ 断面における, A_{fl} 時と LBS 時の間の応力変化量 (測定値) を同断

第4表 速度, 加速度等の測定結果

船名	T丸	H丸	Mm丸	Ms丸
最大進水速度	6.6 m/s	6.2 m/s	6.3 m/s	5.7 m/s
面上時の時刻	21.0 sec	21.5 sec	19.2 sec	20.0 sec
面上時の走行距離 (82 m)	(67 m)	64 m	(58 m)	
L.B.S.の時刻	23.2 sec	24.5 sec	25.3 sec	24.5 sec
面上時の速度	6.3 m/s	5.7 m/s	6.0 m/s	4.8 m/s
面上時の走行距離 (96 m)	(85 m)	103 m	(84 m)	
L.B.S.時のA.P.の垂直加速度(上向)	0.039 g	0.025 g	(0.01 g)	0.021 g

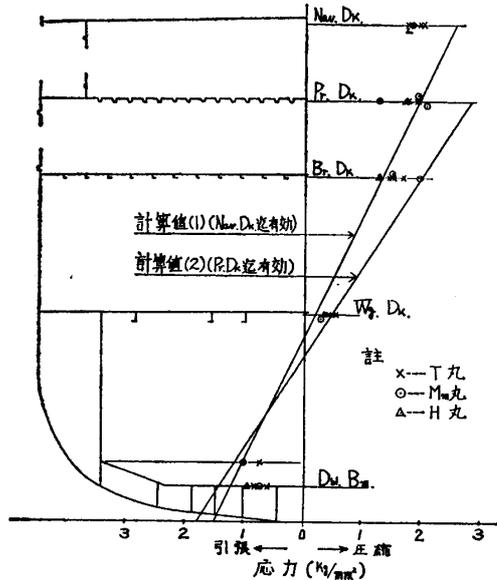
註: () 内の値はやや不正確と思われるもの。

面の曲げモーメント変化量（5章で述べる計算値）で割った曲げモーメント 10,000 t-m 当りの応力分布を第4図に示す。同図には航海甲板 ($N_{av}D_k$) まで有効とした計算値 (1) と遊歩甲板 (P_rD_k まで有効とした計算値 (2) も記入した。

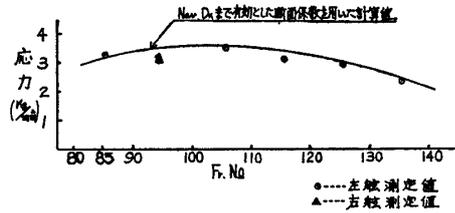
ロ) 遊歩甲板舷側沿いの曲げ応力分布

M_m 丸の測定結果と計算値を第5図に示す。

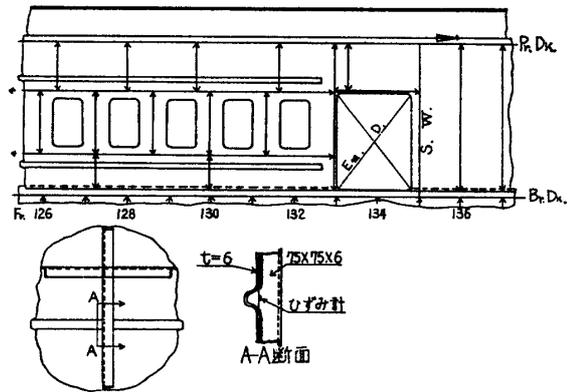
3.4 局 部 応 力



第4図 $F_r 95 \frac{1}{2}$ 断面内応力分布



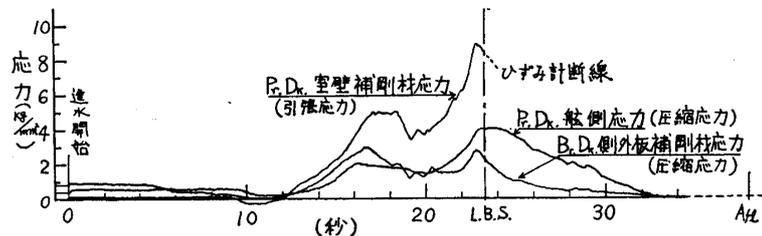
第5図 遊歩甲板舷側沿いの曲げ応力分布 (M_m 丸)



第6図 水平波形鋼板補剛材応力測定部分 ($B_r D_k$ 側外板)

イ) 水平波形鋼板補剛材の応力

T丸では $B_r D_k$ 側外板および $P_r D_k$ 室側壁の角窓の上下に各一条の水平波形を持つ鋼板が用いられている。そしてこれらの鋼板は第6図に示すように水平および垂直の逆山形剛で補剛されている。船体が曲げモーメントを受けて彎曲する場合には、このように波形断面の形状変化を拘束された波形鋼板は平らな鋼板とはほぼ同様にせん断力を伝達する能力を持ち、それより中立軸から離れた連続する部材も曲げ強度および剛性に充分効くのであるが²⁾、反面垂直補剛材の波形と交叉する部分には波形を拘束する反力によりかなりの力が作用する場合があるのではないかと考えられた。この点について予備試験的に調べるためせん断力も曲げモーメントもかなりの大きさを持つと思われる $F_r 130$ の断面で各壁1ヶ所ずつ第6図に示す位置で垂直補剛材の応力を測定した。その



第7図 水平波形鋼板補剛材応力測定記録 (T丸)

結果、測定記録を第7図に示すごとく意外に大きい応力が測定された。同図には $P_r D_k$ 舷側 ($F_r 105 \frac{1}{2}$) の応力の記録も比較のため記入した。なお LBS 時の $F_r 130$ におけるせん断力および曲げモーメントは 730 t および 10,200 t-m である。

ロ) 内底板開口部の応力

新造連絡船では横隔壁のすぐ船首側の内底板下に横方向にビルジ溜めを設け、ビルジの流入を容易にし、また工作に便なように、強度上は好ましくないのであるが、内底板にかなり大きい孔を第8図のごとく横に連続して

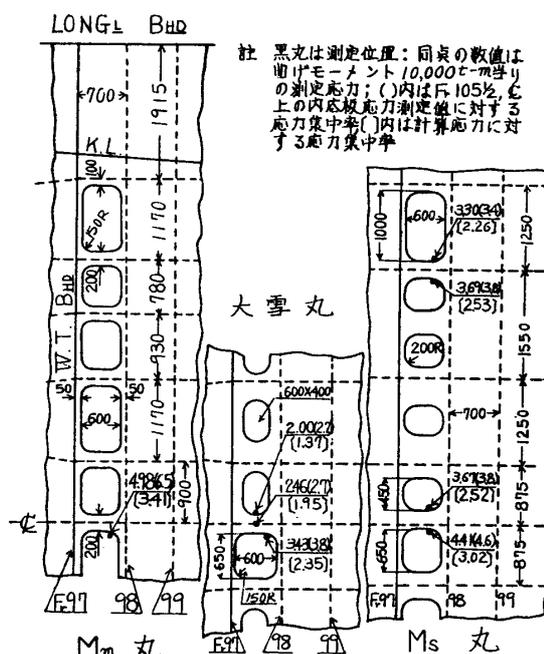
あけてある。これら開口の隅角の応力集中が強度上問題であるかどうかを検討するため Mm 丸, Ms 丸および大雪丸 (この計測のみを行った) で測定を行った。

測定断面の曲げモーメント 10,000t-m 当りの各測定点での測定応力および下記二種類の応力集中率を第 8 図に記入した。すなわち () 内の値は $F_T 105^{1/2}$ の中心線における内底板測定応力 (曲げモーメント 10,000t-m 当り) を 1 とした時の集中率, [] 内の値は, 測定断面に開口がないとして求めた計算応力を 1 としたときの集中率である。同図によれば開口の割合が最も大きく隅角の曲率の大きい Mm 丸が最大の応力集中率を示している。

なお大雪丸では曲げモーメントの計算に必要な測定を行なわなかったから, 開口のない部分の内底板応力の測定値から他船との比較により曲げモーメントを推定して同図の値を算出した。

3.5 たわみ

測定を行った T 丸, H 丸および Mm 丸の LBS 時と A_{F1} 時の間のたわみの変化量の測定値および計算値を第 5 表に示す。



第 8 図 内底板開口部の応力集中率

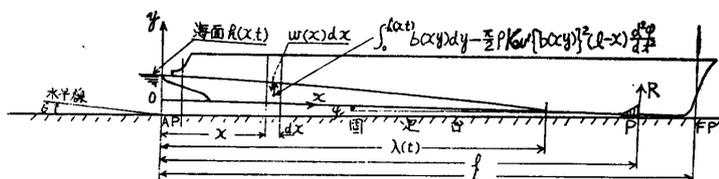
4 LBS 時の付加質量

進水時船尾が浮揚しつつある間の船体の運動を進水架前端と固定台との接点 P (反力 R の作用点) は不動で海面が刻々と上昇し, これにつれて船体が P のまわりに回転運動すると考える。第 9 図のごとく座標および寸法を

第 5 表 たわみの測定値と計算値

船名	計算値		測定値
	遊歩甲板ほどを有期とした場合	航海甲板ほどを有期とした場合	
T 丸	41.7 (6.0)	31.9 (6.0)	32.7
H 丸	48.5 (9.0)	37.6 (9.0)	41.8
Mm 丸	37.6 (7.2)	29.2 (7.2)	31.0

註 計算値の () 内の値は剪断によるたわみ



第 9 図 進水時船体に作用する力

定め, 時間 t における海面の高さ $h(x,t)$, $h=0$ をなる x の値を $\lambda(t)$, x における単位長さ当りの船体重量を $w(x)$, 排水量を $2\rho \int_0^{h(x,t)} b(xy)dy$, (ρ は海水比重, $b(xy)$ は半幅), 付加質量を $\frac{\pi}{2}\rho K_w' \{b(xh)\}^2$, ($h=h(x,t)$, K_w' = 付加質量係数) とし, $\theta, \theta-\varphi$ あるいは $d\varphi/dt$ が微小であるとして 2 次の微小量を無視すると, 動的釣合条件から (1), (2) 式が得られる。ただし $h_a(x)$ は A_{F1} 時の海面高さである。

$$\left[2\rho \int_0^L (l-x) \int_0^{h_a(x)} b(xy)dydx + \frac{\pi}{2}\rho K_w' \int_0^{\lambda(t)} \{b(xh)\}^2 (l-x)dx \right] \frac{1}{g} \frac{d^2\varphi}{dt^2} = 2\rho \int_0^{\lambda(t)} \int_0^{h(x,t)} b(xy)dydx + R - 2\rho \int_0^L \int_0^{h_a(x)} b(xy)dydx \quad (1)$$

$$\left[\int_0^L w(x)(l-x)^2 dx + \frac{\pi}{2}\rho K_w' \int_0^{\lambda(t)} \{b(xh)\}^2 (l-x)^2 dx \right] \frac{1}{g} \frac{d^2\varphi}{dt^2} = 2\rho \int_0^{\lambda(t)} (l-x) \int_0^{h(x,t)} b(xy)dydx - 2\rho \int_0^L (l-x) \int_0^{h_a(x)} b(xy)dydx \quad (2)$$

$d^2\varphi/dt^2$, $h(x,t)$, $\lambda(t)$ および $h_a(x)$ を測定すれば (1), (2) 式より K_w' と R が求まる。ただし $w(x)$ として実際の重量分布を用いるのは煩雑であるから (3) 式の楕円分布を用いた。こうしても K_w' や R の値への影響は小さい。

$$w(x) = \frac{8\rho \int_0^L \int_0^{h_a(x)} b(xy) dy dx}{\pi \cdot L} \left\{ 1 - \frac{(x-L/2)^2}{(L/2)^2} \right\}^{1/2} \quad (3)$$

LBS 時の $h(x,t)$ 分布 (第3図), $1/g \frac{d^2\varphi}{dt^2}$ (第4表) および $h_a(x)$ (第3図) の測定値を用いて求めた K_w' および R の値を第6表に示す。同表には造船所が行った静的進水計算による R の値も記入した。第6表によれば付加質量係数 K_w' は 2.2~3.0 の範囲内にある。これらの値は船型から考えて一見過大なように見えるが、水深が浅いこと、あるいは側壁がかなり近いこと (Mm 丸で特に著しい) を考えれば必ずしも不当ではないと思われる。船底水圧の測定結果 (第3図) も、定性的にはあるが、この程度の付加質量を考えることの妥当性を示しているといえよう。なお、 R の作用点 P としては進水架前端がバウスラスト開口部より船尾側にあつた T 丸では実際の進水架前端をとつたが、進水架前端構造が開口の前後に分けて設けられた他船では実際の前端とバウスラスト中心との中点を P 点とした。

第6表 K_w' および R

船名	K_w'	R (kg)	
		(8)(9) 式より	静水計算より
T 丸	2.49	944	970
H 丸	2.23	946	830
Mm 丸	3.05	726	790
Mh 丸	2.57	907	786

5 曲げモーメントおよびたわみの計算

5.1 曲げモーメントの計算

LBS 時と時と A_{fi} の間の曲げモーメント変化を次のごとくして求めた。

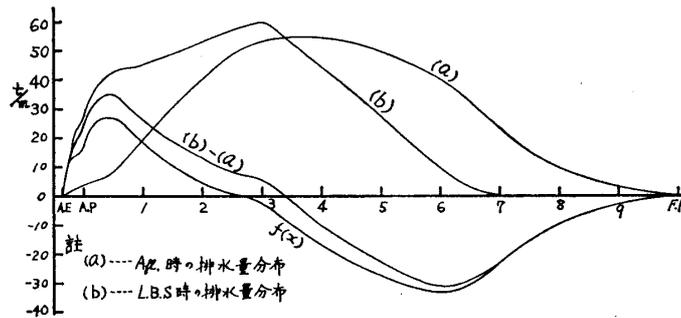
まず各断面における A_{fi} 時の排水量分布から、LBS 時の排水量分布と船体および付加質量の慣性力との差を差引いた下向き分布荷重 $\{f(x)\}$ を求める。これと P 点に作用する上向きの集中反力 (R) とが釣合う。すなわち

$$f(x) = \int_{h(x,t)}^{h_a(x)} b(xy) dy + \left[w(x) + \frac{\pi\rho K_w'}{2} \{b(xh)\}^2 \right] \frac{(l-x)}{g} \frac{d^2\varphi}{dt^2} \quad (4)$$

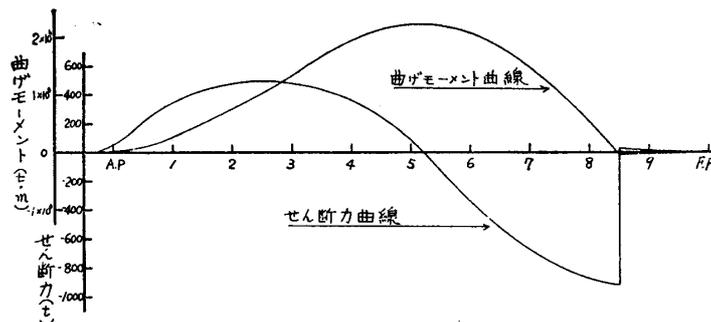
(4) 式により求められた分布荷重の例 (T 丸) を第 10 図に示す。

同図には (4) 式右辺第 1 項 (排水量の差) のみの分布および各時期の排水量分布も示した。

$f(x)$ と R とよりなる荷重系からせん断力 $[S(x)]$ 分布および曲げモーメント $[M(x)]$ 分布を (5) 式 (6) 式により求めた。その結果の例 (T 丸) を第 11 図に示す。



第 10 図 T丸の $f(x)$ 分布



第 11 図 T丸のせん断力および曲げモーメント分布

$$\left. \begin{aligned} S(x) &= -\int_0^x f(x)dx \dots\dots\dots 0 < x < l \\ S(x) &= -\int_0^x f(x)dx + R \dots\dots\dots x > l \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} M(x) &= -\int_0^x (x+\xi)f(\xi)d\xi \dots\dots\dots 0 < x < l \\ M(x) &= -\int_0^x (x-\xi)f(\xi)d\xi + R(x-l) \dots\dots\dots x > l \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

第7表 $F_r 105 \frac{1}{2}$ における曲げモーメント

船名	T丸	H丸	M丸	M _s 丸
曲げモーメント (t-m)	21080	24000	18,700	21760

また各船の $F_r 105 \frac{1}{2}$ 断面における LBS 時の曲げモーメントは第7表のとうりである。

5.2 たわみの計算

イ) 曲げモーメントによるたわみ (δ_b)

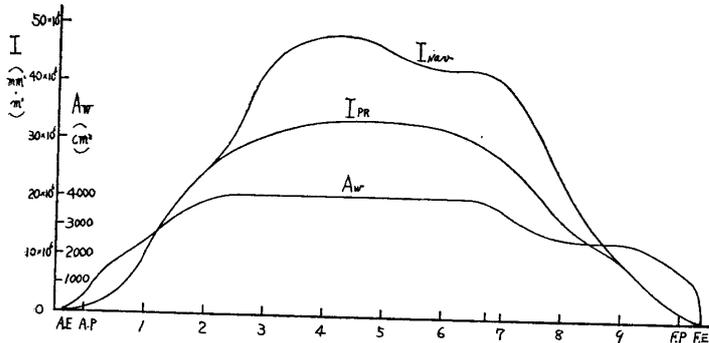
曲げモーメントによるたわみ δ_b の微分方程式は (7) 式である。

$$\frac{d^2\delta_b}{dx^2} = -\frac{M(x)}{EI} \quad (7)$$

これを解いて

$$\delta_b(x) = \int_0^x -(x-\xi)\frac{M(\xi)}{EI}d\xi + C_1x + C_2 \quad (8)$$

積分常数 C_1 および C_2 は $x=0$ および $x=L$ で $\delta_b=0$ という条件で求められる。また E としては 2.1×10^6 kg/cm² を使い、 I の分布としては、第12図に示す $N_{av}D_k$ 以下の縦通材を用いて求めた分布 I_{Nav} と P_rD_k



第12図 I および A_w の分布

以下のそれを用いて求めた分布 (I_{PR}) のそれぞれを用いた、 δ_b 曲線の1例 (T丸) を第13図に示す。

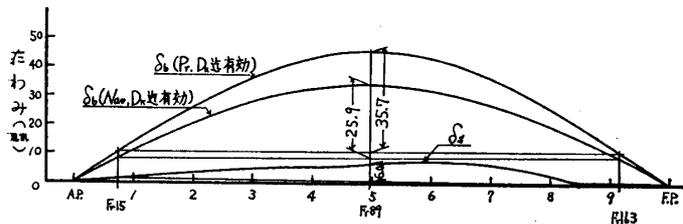
ロ) せん断によるたわみ

試験連絡船のように長さの割に有効深さの大きい船ではせん断によるたわみの割合が大きく、たわみの計算値を求める際、これを無視することは許されない。

I形梁の突縁板の断面が充分大きいときにはせん断によるたわみ $\delta_s(x)$ は近似的に (9) 式で与えられる。

$$\delta_s(x) = \int_0^x \frac{S(x)}{A_w G} dx + C_3x + C_4 \quad (9)$$

ここに A_w は腹板のみの断面積、 G はせん断弾性係数、 C_3, C_4 は積分常数



第13図 T丸の計算たわみ分布

である。

試験連絡船のように突縁部分が何層にも分れていたりまた腹板部分も断面が変化したり、所により傾いていたりにしている梁においては (9) 式の近似度はいくらか低いと考えられるが、計算が簡単であり、また (9) 式を用いることにより生ずる誤差の全たわみに対する割合は小さいと考えられるから (9) 式により δ_s を求めた。

この場合 A_w は縦通隔壁および垂直外板の全断面積と傾斜部外板の断面積の垂直成分 $\int t \sin \theta ds \dots\dots$ (t は板厚、 θ は水平線に対する傾斜、 s は外板に沿つての長さ) の和であるとした。 A_w の分布を第12図に、 δ_s 曲線の1例 (T丸) を第13図に示す。

第13図には $F_r 15$ と $F_r 163$ の間の各たわみの計算値のとり方およびその値を示す。また第5表はたわみの測定値と対応する全たわみ ($\delta_b + \delta_s$) の計算値とを比較したものである。同表によればせん断によるたわみは全たわみの 20% 余りであることがわかる。

6 上層甲板の有効性と曲げ応力分布についての考察

第5表によればたわみの測定値は $N_{av}D_k$ まで有効とした計算値よりやや小さいが極めて近い。この点だけからも P_rD_k までには完全に有効に縦強度に効いており、 $N_{av}D_k$ もかなりの割合で効いていることが推定される。

第5図の P_rD_k の舷側における曲げ応力分布の計算値と測定値の比較結果からも全く同様な推定が可能である。

さらに第4図の $F_r 105 \frac{1}{2}$ 断面における曲げ応力分布によりこの点を検討すると次のとおりである。一般に、ある断面内の曲げ応力分布から各部材の曲げに対する有効性を検討する場合には、その断面の前後における各部材の断面の変化を充分調査しておかぬと誤まった結論を導く恐れがある。 $F_r 105 \frac{1}{2}$ 断面の前後における断面の変化は次の通りである。

イ) 内底板; $F_r 97$ と $F_r 98$ の間および $F_r 110$ と $F_r 111$ の間には第8図に示すようなビルジ溜めのための開口が横に並んでいて内底板断面積が 42%~57% に減少している。さらに $F_r 101$ ~ $F_r 108$ の間には 354×12 の腹板と 180×16 の突縁よりなる発電機支持台が6本船首尾方向に取付けられている。その断面積は開口のない内底板断面積の約 23% である。すなわち $F_r 105 \frac{1}{2}$ の発電機支持台の断面積を含めた内底板断面積は $F_r 97 \frac{1}{2}$ のその 2.2~3 倍となっている。

ロ) P_rD_k ; $F_r 106$ ~ 107 の間に便所設備のための開口が多数明けられており、それによる鋼甲板の断面減少率は 28% に達している。

以上を念頭において第4図の測定値と計算値を比較すると、内底板の応力が $N_{av}D_k$ まで有効とした計算値(1)よりも大幅に小さく約 60% であることは、上記イ)で述べた断面変化によるもので、もし断面変化がなければ、この計算値に近い値になるであろうと推定される。同様にして P_rD_k の応力が計算値(1)よりやや小さいのも上記ロ)で述べた断面変化によるものといえよう。 $N_{av}D_k$ の応力が計算値(1)より小さいのは同甲板の長さがやや短かく、外板が同甲板まで達しておらず、また側壁に大きい窓が連続して開いていてそのせん断剛性が低いことなどによるもので、同甲板の有効度は測定値と計算値(1)との比の 60~70% 程度であろうと推定される。断面変化のない B_rD_k および W_gD_k の応力は計算値(1)を僅かに上回っており、これまでの推定と一致している。

以上の考察から逆にこれら連絡船が波浪中を航行する際に受ける曲げモーメント変化は P_rD_k あるいは B_rD_k の舷側で応力変化を測定することによりかなり正確に推定することができるといえる。

7 局部応力についての考察

7.1 水平波形鋼板補剛材の応力

第7図に測定記録を示すごとくT丸の $F_r 130$ における B_rD_k 側外板および P_rD_k 室側壁の水平波形鋼板に取付けられた垂直補剛材の波部における応力は意外に大きく、特に P_rD_k 室壁のそれは非常に高い。

また P_rD_k 室側壁では S_{ag} 状態で引張応力を生じているのに対し B_rD_k 側外板では圧縮応力となっている。T丸についての資料はこれらの現象の原因を検討するには、あまりに不十分であつたから、引続き他の船についても計測する予定であつたが、他の総ての船では水平波形鋼板を用いなくなつたので追加資料が得られなくなつた。それゆゑ、ここではこれらの現象に関係があるかも知れないと思われる事項を記すに止め、原因の考察は省略する。

まず P_rD_k 室側壁では $F_r 130$ 附近より船首側にはほとんど窓がなく、したがつて水平波形鋼板が用いられていないが、それより船尾側には大きな窓の開口が連続している。すなわち室壁のせん断剛性が $F_r 130$ 附近を境に大幅に変化している。これに対し B_rD_k 側外板では $F_r 143$ 附近から船首と $F_r 98$ 附近から船尾では B_rD_k が、それより下の外板より外側に張出しているため外板が上下に連続せず途中に水平な折曲りが入つた形となっている。すなわち外板の上下方向の直応力に対する剛性が若干低下していると考えられる。(せん断剛性についてはいずれとも判定し難い)

7.2 内底板開口部周辺の応力集中

第8図に示すごとく横隔壁直前の内底板に横方向に並んだ開口の隅角部では非常に大きい応力が測定された。中でも Mm 丸では $F_r 105 \frac{1}{2}$ の中心線桁板直上での応力と比較した応力集中率が 6.5 に達している。その他の

船でも最大値は大雪丸の 3.8 Ms 丸のとかかなり大きい。このように応力集中率が高くなつたのは形状による応力集中に 6 章イ) で述べた断面変化による応力増加が重なつたためであろう。これらの集中率のベースである $f_r 105^{1/2}$ での応力が発電機支持台による断面増のため減少している影響を除くため、測定断面での計算曲げ応力をベースとして応力集中率を求めると、第 8 図の [] 内に記すごとくなり、最大が Mm 丸の 3.4 となる。Mm 丸の開口部での内底板の断面積は、計算に用いた断面積の 1/2.3 であるから縦通桁、外板等へ応力が転嫁される影響を考へても形状による応力集中率は 3.4/2.3 よりやや大きい程度で特に大きいというほどでないと考えられる。また第 8 図によれば開口による断面減少率を小さくしたり、あるいは隅角の曲率を小さくすればそれにつれて応力集中率も減ずることがわかる。

いずれの理由で高い応力集中を生じたかは別としても Mm 丸の測定応力は $P_r D_k$ などの応力に較べても 3 倍近く大きいから、この部分の強度特に疲労強度上の安全性について次のごとく検討した。

まず問題の応力集中部が波浪曲げモーメントの繰返しにより受ける応力全振幅の頻度分布であるが、幸い同一航路を走る船型も主要寸法も似かよつた空知丸形連絡船 ($B_r D_k$) についての測定結果³⁾があるので、これを基にして主要寸法、断面係数、応力集中等による修正を行なつたところ、中央値 $\delta_m = 0.92 \text{ kg/mm}^2$ で標準偏差 (自然対数) $S_0 = 0.723$ である対数正規分布に従うとすれば若干安全側であると推定された。

次に問題の箇所の疲労強度であるが、常に腐蝕環境にあること、パイプ等の取付け溶接を行うことがあるかも知れないこと等を考へて、附加物溶接部とはほぼ同じ強度を持つとして、両対数紙上での破壊確率 5% の P-S-N 線図が $N=10^2$, $S=65 \text{ kg/mm}^2$ の点を通り勾配 $K=-0.20$ の直線 (N の増加につれて S は無限に下がる) であると仮定した⁴⁾。

年間の応力変動の繰返数を 1.5×10^6 回と仮定して、筆者の疲労寿命計算法⁵⁾により、5% の確率で疲労破壊の起る年数を求めたところ 175 年となつた。

すなわち高い応力集中にもかかわらず、はなはだしい腐蝕といった他の因子による悪影響がない限り、強度上の心配はないであろうと推定された。

8 あとがき

新造青函連絡船のうち 4 隻の進水時を利用して強度試験を行い、次の結論を得た。

(1) 船尾浮揚時と完全浮揚時の曲げモーメントの差は船尾浮揚時の喫水分布、上下方向加速度およびできれば船底水圧分布を計測し、付加質量を仮定することにより動的釣合条件からかなり正確な値が推定できる。(2) 各断面における付加質量が喫水面の幅を直径とする半円の K_w' 倍であるとして計算すると $K_w' = 2.2 \sim 3.0$ となつた。(3) たわみの測定値は航海甲板まで有効とした曲げモーメントによるたわみとせん断力によるたわみの合計に極めて近い。せん断力によるたわみは全たわみの約 20% であつた。(4) 曲げ応力の断面内分布、縦方向分布あるいはたわみの測定値と計算値の比較により上層甲板のうち遊歩甲板は 100% 有効に効いており、航海甲板もかなりの程度に効いていることが示された。(5) 内底板開口部にはかなり大きい応力集中が認められたが、波浪による曲げ応力頻度の計測結果を用いて検討した所疲労破壊の可能性は極めて小さいことが示された。

これらの各試験は各船を建造した造船所と鉄道技術研究所が協力して行なつたものである。また試験遂行に当つては国鉄本社船舶局より数々の援助を受けた。ここに関係各位に深く感謝する次第である。とりわけ試験および結果の解析を通じて終始熱心に協力された鉄道技研連絡船研究室、中野、吉田、両職員に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 白石, 新造青函連絡船の進水時強度試験に用いた各種の動的測定法; 造船協会論文集 117 号
- 2) 白石, コルゲートプレートのせん断剛性; 造船協会論文集 115 号
- 3) 白石, 戦標形連絡船の船質; 鉄研報告第 493 号
- 4) 白石, 溶接技術者のための疲労に関する一般常識; 溶接技術 12 巻 3 号
- 5) 白石, 青函連絡船用車両緊締具の強度, 鉄研報告第 356 号