高張力鋼を使用した船殻部材の 疲労強度に関する考察

正員 的 場 正 明* 正員 井 上 克 明*

Fatigue Strength of Hull in Use of High Tensile Steel

by Masaaki Matoba, *Member* Katsuaki Inoue, *Member*

Summary

To improve the effectiveness in ship performance, more and more high tensile steel has come to be employed than hitherto.

One of the problems to be addressed when using the high tensile steel for the ship hull is that of fatigue strength. For with the high tensile steel, compared with mild steel, its fatigue strength does not improve so much as its tensile strength when used in the ship hull.

The authors studied the high tensile steel K factor based on relevant literatures and, to increase the fatigue strength of high tensile steel structure, explored the possibility of fabrication process improvement by the TIG dressing, as well as of structural improvement by modifying, for example, the vertical frame bottom end and the slot in the transverse ring. In this connection, test was conducted, which was a basic model test using a simple specimen fabricated by fillet welding two adjoining attachment to a flat plate.

The studies showed that although the high tensile steel structure would exhibit almost no appreciable improvement in fatigue strength at the welded joints of high stress concentration as compared with the mild steel structure, this shortcoming could be dealt with by slightly modifying the detail structure. It was also found that the TIG dressing would not raise but reduce the structural strength when the fillet welded joints were located very close to each other.

1 概 要

新造船における性能向上のために高張力鋼の採用比率が高まっている。

船殻部材に高張力鋼を使用する際に注意すべき点の一つに疲労強度がある。すなわち、高張力鋼は軟鋼と比べて、引張強度の向上度合ほど疲労強度は向上しない。

本研究では、文献調査により高張力鋼係数に関し考察を行い、さらに高張力鋼の疲労強度向上対策として、TIG ドレスによる施工面での改良と、ホールドフレーム下端とスロットを例に詳細構造の改良について考察した。

この際、基礎モデルとして近接した 2 個の隅肉溶接された付加物を有する継手のテストを行い考察の基礎データとした。

研究の結果、高張力鋼は応力集中の大きな継手では、軟鋼と比べ疲労強度向上はほとんど認められないが、詳

細構造の若干の改良により対策しうることを確認した。また TIG ドレスによる疲労強度向上対策は溶接ビードが近接した場合、逆に強度が低下することを明らかにした。

2 各種ルールにおける高張力鋼係数

各種の機種を対象に溶接継手の疲労許容応力(規格)が示されているが、抗張力 $41 \text{ kg/mm}^2 \sim 55 \text{ kg/mm}^2$ 程度では許容応力に差をつけていない規格が多い。その理由は強度特に疲労限度強度に有意差が認められないことである。許容応力に差をつけていない規格としてたとえば下記がある。

ASME Sec III (1975): 原子力, ボイラーおよび圧力容器 (米)

AWS (1976): 橋梁等一般鋼構造物 (米)

本四連絡橋 (昭和 49 年): 土木学会

BS 153 (1972): 橋梁 (英)

抗張力 55 kg/mm^2 クラスの鋼材の継手の疲労強度は

* 三菱重工業(株)長崎研究所

Table 1 GL's high tensile steel strength ratio on fatigue view

Notch Group	C	Strength Ratio to Mild Steel		K Factor	
		32k Class	36k Class	32k Class	36k Class
K ₀ Base Metal, Flashed Long ¹ Weld	1.0	1.28	1.4	0.78	0.714
K ₁ Trans Butt Weld Cont. Fillet Weld Special Class	0.8	1.18	1.256	0.847	0.796
K ₂ Light Tapered Butt Weld Usual Cont. Fillet Weld	0.6	1.10	1.144	0.91	0.874
K ₃ Round Welded Attachment	0.4	1.045	1.064	0.957	0.94
K ₄ Round Welded Attachment Notsoft	0.2	1.011	1.016	0.989	0.984

軟鋼のそれと比べ疲労限度では差は少ないが、低繰返し強度ではより差がある。したがって疲労限を超える応力を受ける不規則外力下では、低繰返し強度域で高張力鋼は疲労強度上軟鋼より高強度であるため、同じ繰返しに對し低い累積被害度となり、数値的にはわずかである可能性もあるが、より高強度である。

船体は波浪による不規則外力を受ける構造物であり、疲労強度により寸法の定まる部材についても K ファクタ (使用板厚の軟鋼に対する減少率) により、その数値的根拠があいまいながらも、寸法差をつけている。

不規則外力下の高張力鋼の許容応力比は IIW (国際溶接会議) 等でも比較的活発に研究されており¹⁾、また船級協会においても疲労強度の考慮を明記したマニュアル、ルールでは高張力鋼を使用するに當っての疲労強度上、寸法決定のための係数が各種示されている。Det NV の "Ships' Load and Strength Manual" (1978) では、疲労強度は降伏応力 σ_Y の平方根に依存するとし、高張力鋼のその軟鋼との比は $\sqrt{\sigma_Y/24}$ で表わされる。 K ファクタは 32k 級鋼で 0.866、36k 級鋼で 0.8165 である。German Lloyd's の Vorshriften (1980) によると、高張力鋼の疲労強度の軟鋼に対する強度比は $1+c^2y$ で表わされる。 c は切欠の程度により与えられ、 y は抗張力により与えられる係数である。Table 1 に強度比および K ファクタ (強度比の逆数になる) を示す。

GL と NV の K ファクタの取扱いを比較すると、応力集中率が高いほど高張力鋼と軟鋼の疲労強度差が少ないという現象をこまかく分けた点で GL の方が合理的であると思われるが、ルールの使用実績は少なく、実験データ、実船実績を積み重ね今後数値的に吟味すべき予地があろう。なお、他の船級協会ルールにおける一般的 K ファクタは 32k 級鋼で 0.78、36k 級鋼で 0.72 である。

3 累積被害度からみた高張力鋼係数と 2～3 の施工上の問題

高張力鋼の基礎継手の疲労強度データについては、

SR 193, SR200-11 の他文献²⁾ で収集されている。その結果最近の新制御圧延鋼 (TMCP 鋼) は通常高張力鋼と疲労強度上差異がないことも判明している。本研究では、各継手での累積被害度を算出する目的で、軟鋼および高張力鋼の黒皮付母材、突合せ横継手、リブ付荷重非伝達十字継手のデータを収集整理した。参考文献、収集方針等の詳細は文献による²⁾。完全片振り $R=0$ での $S-N$ 線図を Fig. 1～6 に示す。

船体のように不規則外力を受けるものは累積被害度をもとに議論すべきとの見解のもとに、前記した軟鋼および高張力鋼の 3 種の基礎継手について累積被害度を計算した。計算条件は下記のとおりである。

a) 抗張力は、軟鋼で 45 kg/mm²、高張力鋼で 55 kg/mm² とした。b) 疲労限以下の強度に対する配慮として Haibach 法³⁾を用いた。c) 応力範囲と累積頻

Fig. 1 S-N curve of base metal with mill scale (MS)

Fig. 2 S-N curve of base metal with mill scale (HT 50)

Fig. 3 S-N curve of butt welded joint as welded (MS)

Fig. 4 S-N curve of butt welded joint as welded (HT 50)

Fig. 5 S-N curve of non load carrying type cruciform welded joint (MS)

Fig. 6 S-N curve of non load carrying type cruciform welded joint (HT 50)

度の関係を片対数グラフ上で直線とした。d) 応力繰返し数を 20 年 10^8 回とした。e) 平均応力の影響を無視した。累積被害度の計算結果が 1.0 となる軟鋼と高張力鋼での応力比を Fig. 7 に示した。この結果は応力集中の高い継手ほど高張力鋼が相対的に低強度であり、GL

Fig. 7 Coefficient of high tensile steel obtained from cumulative fatigue damage

のルールを裏付ける結果となった。

高張力鋼が切欠に敏感なゆえに、工作法上気にかかる点がいくつかある。そのうちガス切断について文献⁴⁾をもとに若干ふれる。

ガス切断の表面粗さについてみれば、黒皮と同程度の粗度 $60 \mu\text{m}$ 以下ならば疲労強度に与える粗さの影響はない。通常の切断であれば $10^5 \sim 10^6$ 回時間強度は引張強さとともに上昇する (しかし 0.5 mm 程度の切断欠陥があると疲労強度は約 $1/2$ になることもありうる)。

4 施工による強度改善法概要

施工による強度改善法としていくつかの方法が実用化されている。その主要な、実施法と特徴を飯田教授の論文⁵⁾より抜粋し Table 2 に強度の向上度合と合わせて示す。

TIG ドレスは、橋梁、パワーシャベルの疲労強度向上対策に実用化されており、通常の高張力鋼と同じ方法で行える。強度の向上は 1.5 倍以上は期待できるであろう。

グラインダードレスは機械的な加工であり、石油掘削リグの仕口等に使われている。古くからの方法であり、なじみもあり船主、船級協会に認められやすいが、施工に要する時間が多い欠点がある。

強度向上用溶接棒は各溶接棒メーカーで開発されているが、強度の向上度合は、いわゆる化粧盛程度でありさほど大きなものではない。

Table 2 Comparison of characteristics of various method improving fatigue strength in welded joint

Method	Type of Welded Joint	Workability		Steel	Fatigue Strength (2×10^6) Improving Ratio	IIW XIII Doc. No.
		Shop Welding	Field Welding			
TIG Dressing	SAW Butt	Good	Slightly Good	HT 50	2.31 1.56	735-74 771-75
	SMAW Butt			HT 80	1.51~1.75	773-75 774-75
	SMAW Fillet			HT 80	2.79~3.53	829-77
	MIG Fillet			HT 60	1.43	830-77
Plasma Dressing	SAW Butt	Good	Bad	HT 50	1.40	774-75 829-77
	SMAW Butt			HT 50	1.65	
	SMAW Fillet			HT 80	3.21	
	SMAW Butt			HT 80	1.73	
	SMAW Fillet			HT 80	3.57	830-77
CO ₂ Soft Plasma	MIG Fillet			HT 60	1.77	
Improved Coated Electrode	SMAW Fillet, Horizontal	Good	Good	HT 50	1.19	828-77
	SMAW Fillet, Horizontal			HT 60	1.86	
	SMAW Fillet, Horizontal			HT 80	1.71	
	SMAW Fillet, Horizontal			HT 80	1.49~2.27	735-74 772-75 829-77
	SMAW Fillet, Horizontal			HT 80	1.69~2.27	
	SMAW Fillet, Vertical Down			HT 80	1.25~1.69	835-77
	SMAW Fillet, Horizontal			HT 80	1.22~1.37	
	SMAW Fillet, Vertical Down			HT 80	1.25~1.45	
Grinder Dressing	SAW Butt	Bad	Bad	HT 50	1.58~2.36	735-74 774-75
	SMAW Butt			HT 80	1.71	829-77
	MIG Fillet			HT 60	1.25	830-77
	SMAW Fillet, Horizontal			HT 80	1.05	835-77

SAW : Submerged Arc Welding

SMAW : Shield Metal Arc Welding

MIG : Metal Inert Gas Welding

本研究では実績もあり造船所の既存設備で施工可能な TIG ドレスについて検討することにした。

5 二つの付加物を有する隅肉継手の疲労試験

前述した TIG ドレスによる強度改善効果の確認と疲労強度上問題となるスティフナ端、スキヤロップ部等の溶接ビード近接部の近接距離の疲労強度に与える影響を調べる目的で、Fig. 8 に示す二つの付加物を有する隅肉継手の疲労試験を片振り引張条件下で行った。

供試材は Table 3 に示すとおりであり、従来型およ

び非水冷却 TMCP 高張力鋼である。試験系列を Table 4 に示す。

試験結果（公称応力範囲 σ_R と破断繰返し数 N_f の関係）を Fig. 9 に示す。試験結果より、溶接のままの継手の強度は付加物の近接距離の影響を受け、距離 18 mm と 30 mm はほぼ同じ強度であるが、距離 40 mm の継手より若干強度が低い。TIG 処理をほどこした場合近接距離 30 mm の継手は TMCP 鋼、従来鋼ともに同強度であり、2 百万回強度は溶接のままの継手のほぼ 2 倍に上昇する。一方、近接距離 18 mm の継手に TIG ドレスをほどこした場合、溶接のままの継手より強度が低下している。

これらの強度の差異を生ずる原因について調査した。疲労強度に与える影響因子のうち、最大のものは応力集中である⁷⁾。また残留応力、硬度にも影響を受ける。この 3 点の因子について以下調査する。

溶接ビードの趾端形状のマクロ写真の例（TMCP 鋼）を Fig. 10 に示す。溶接のまま継手のビード形状は若干オーバーラップぎみであるが各継手ともほぼ同じである。TIG ドレスを行った継手はビード形状は良くなっているが、付加物

Fig. 8 Specimen for fatigue test

Table 3 Chemical compositions and mechanical properties

Produce Process	Material	Plate Thickness (mm)	Chemical Compositions x100 (%)										Mechanical Properties		
			C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Al	Ceq.	Yielding Stress (kgf/mm ²)	Tensile Stress (kgf/mm ²)	Elongation (%)
TMCP (Air Cool)	HT (KA32)	11	12	47	154	1.8	0.3	23	16	—	2.8	40	39	55	24
Conventional			14	43	131	2.8	0.1	1	2	2	3.2	38	35	53	24

$$Ceq. = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24}$$

Table 4 Test series

Distance ℓ (mm)	18		30		40	
	As-Welded	TIG Dress	As-Welded	TIG Dress	As-Welded	TIG Dress
Material						
TMCP HT	CR18	CRT18	CR30	CRT30	CR40	—
Conventional HT	HT18	—	—	HTT30	HT40	—

ド近接による応力集中の干渉については、趾端の曲率半径の2～3倍以下になると影響があるとされている⁶⁾。ビードの趾端の曲率半径は Table 5 より最大 1.5 mm であるので、CRT 18 (TIG ドレス付加物距離 18 mm) 以外は応力集中の干渉はないと考える。また Table 5 は干渉を考へない応力集中の計算例(ビード形状は型取りによる)を示すが、TIG ドレスにより応力集中率が低下することがわかる。

付加物間の残留応力のスリット法による計測結果を

Fig. 9 Fatigue test result of joint with two attachment

Fig. 10 Macro of specimen

Fig. 11 に示す。隅肉溶接側の表面より 1.5 mm 深さラインに沿った残留応力は溶接のままで 5～10 kg/mm² の値であるが、TIG ドレスにより 30～40 kg/mm² にふえることがわかる。

溶接趾端近傍の硬度分布の計測例を Fig. 12 に示す。Fig. 12 より溶接のままの場合と TIG ドレスを行った場合顕著な硬度の差は認められない。

以上より、TIG ドレスによる強度低下の主因となりうるのはビードの近接と残留応力の増大であることがわかる。二つの原因のうちビードの近接の方が影響が大きい、これは Fig. 11 に示すように高強度を示す CRT 30 でも残留応力が大きいことが根拠である。

6 詳細構造改良

隅肉溶接部においては、Fig. 7 に示すとおり軟鋼と高張力鋼に疲労強度差がない為、高張力鋼使用により相対的な疲労強度低下が生じる。したがって、施工面での強度向上対策を行わない場合、詳細構造を変更して応力集中の軽減をはからねばならない。

たとえばスロット構造においては、多くの研究がなされているが⁸⁾、それよりき裂の生じやすいウェブスティフナ基部についてみれば Table 6 に示すような種類があ

Table 5 Stress concentration factor at welded toe (sampled value)

Series No.	h (mm)	S (mm)	d (mm)	ρ (mm)	θ (deg.)	ρ/t	S/t	d/t	$f(\theta)$	$K_t^*)$	Remarks
CR18	5.2	22.4	16.6	1.185	164.9	0.104	1.965	1.456	0.80	1.70	Mean 2.19
CR30	6.2	25.4	17.6	0.285	140.9	0.025	2.228	1.544	1.00	2.60	
CR40	6.0	24.4	17.4	0.610	149.0	0.054	2.140	1.526	0.96	2.31	
HT18	6.0	23.0	17.0	1.325	163.0	0.120	2.091	1.545	0.83	1.81	
HT40	7.0	25.4	18.0	0.575	142.5	0.052	2.309	1.636	1.00	2.51	
CRT18	5.5	28.4	16.9	0.913	164.8	0.080	2.491	1.482	0.80	1.84	for reference
CRT30	6.2	30.5	17.7	1.560	160.6	0.137	2.675	1.539	0.86	1.79	Mean 1.44
HTT30	6.2	30.4	17.2	1.020	162.3	0.093	2.764	1.564	0.84	1.91	

() Shows Welded Toe between Stiffener

*) $K_t = K_{to} \times f(L) \times f(H) \times f(\theta)$

Each Value was Based on Photo Elastic Experiments by MHI for Cruciform Joints with Single Attachment

Fig. 11 Measured residual stress

Fig. 12 Distribution of micro Vickers hardness around welded toe

Table 6 Types of web stiffener root

Type	1	2	3	4
Figure				
A_s	$A_s = (ds - rs)ts$	$A_s = (ds - rs)ts$	$A_s = (ds - rs)ts + (dR - rR)t_R$	$A_s = (ds - rs)ts + (RB - rB)t_B$
f	4.5	3.5	1.8	1.8
Cw_{Filler}	0.17 ~ 0.29	0.17 ~ 0.29	0.15 ~ 0.32	0.15 ~ 0.32
$Cw_{\text{No Filler}}$	0.34 ~ 0.38	0.34 ~ 0.38	0.25 ~ 0.42	0.25 ~ 0.42

 f : Stress Concentration Factor Cw : Load Ratio Transmitted to Web Stiffener

Table 7 Strength increase by figure alternation (slotted part)

	1N	1F	2N	2F	3N	3F	4N	4F
1N								
1F	1.56							
2N	1.29							
2F	2.02	1.29	1.56					
3N	3.75	2.4	2.92	1.91				
3F	5.35	3.75	4.25	2.92	1.43			
4N	4.5	2.88	3.50	2.28	1.2			
4F	6.41	4.5	5.10	3.50	1.72	1.2	1.43	

N : No Filler, F : Filler, i : Type in Table 6

る。各型式の応力集中、荷重分担より形状を変えた場合の強度上昇率を文献 8) をもとに求める。Table 7 にその結果を示す。表中の数値は強度上昇率であり矢印に形状を変更したことを示す。船級協会ルールによる 32k 級高張力鋼の K ファクタは 0.78 (高張力鋼変更にとりなう軟鋼疲労強度に対する強度減少率 1.282), 36k 級高張力鋼の K ファクタは 0.72 (強度減少率 1.389) であるので、たとえば K ファクタで大骨のウェブ等の板厚を落した場合、軟鋼と同じ疲労強度であるためには、Table 7 中で 32k 級鋼の場合は 1.28 以上、36k 級鋼の場合は 1.389 以上になるような形状変更が必要となろう。もちろんウェブスティフナ基部の面積 A_s を落さない処置もある。

Fig. 13 に示すような桁端構造についてみると、応力集中率は端の角度 θ や先端の伸しの長さ b に大きく影響される^{9), 10)}。端部の詳細形状処理による応力集中減少策としては θ , b の寸法変更の他、Fig. 13 に示すトゥ端スニップ (S), 面材端のテーパ、サービン (T), 部分増厚 (I), パッド板 (P) 等の採用がある。これらの形状に対する応力集中率は文献 9), 10) に示されている。前記したスロットにおけると同様な方法で桁端構造に高張力鋼を使用に当たって必要な形状変更を求めよう。

Fig. 13 Figure of hold frame end

7 結 言

最近船舶の性能向上の必要性和新制御圧延鋼板の開発により船殻構造への高張力鋼使用率が高まりつつある。本研究は高張力鋼使用による相対的疲労強度低下に対処するための方法について考察を行った。今後の問題も多くあるが以下の結論を得た。

- (1) 高張力鋼は疲労強度上、応力集中の大きな継手ほど軟鋼に比しての相対的強度向上は少ない。
- (2) 施工による強度改善策としての TIG ドレスを行う場合、ビード趾端が近接する所には使用できない。
- (3) 詳細構造改良による応力集中率低減対策は、わずかな形状変更、寸法変更により高張力鋼使用による相対的疲労強度低下をおぎないうる。

本研究実施に当り有益な協力、助言をいただいた SR 200-11 の委員各位および社内関係各位に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 例えば, Jan Olef Sperle: Fatigue Strength of Welded Joints under Variable Amplitude Loading, IIW-XIII-963-80.
- 2) 例えば, 井上克明, 矢島 浩, 阪井大輔, 他: 新制御圧延型 50 キロ級高張力鋼溶接継手部の疲労強度とその評価, 西部造船会会報, 第 67 号, 昭和 59 年 3 月.
- 3) E. Haibach: The allowable stress under variable amplitude loading of welded joints, Fatigue of Welded Structure Conference, The Welding Institute, 1970.
- 4) Netherlands Institute of Welding, Working Group 1913: The Properties of Flame Cut Edges, Final Report 1975.
- 5) K. Iida: Brief Summary of Japanese Documents Concerned with the Improvement of Fatigue Strength of Welded Joints, IIW-XIII-862-77.
- 6) 西田正孝: 応力集中, 森北出版.
- 7) 的場正明: 信頼性解析にもとづく船殻構造の疲労設計, 日本造船学会論文集, 第 151 号, 昭和 57 年.
- 8) K. Iida, M. Matoba: Japanese Study on the Fatigue Strength of Slotted Parts in Ship's Hull Members, IIW-XIII-834-77.
- 9) K. Iida, M. Matoba: Evaluation of Fatigue Strength of Hold Frame Ends in Ship Hulls, IIW-XIII-950-80.
- 10) 長野 健, 他: 船殻局部構造の疲労強度に関する研究 (第 2 報), 石川島播磨技報 17-5, 昭和 52 年.