すみ肉溶接継手の疲労強度に対する腐食衰耗の影響について

正 員 湯 浅 通 史* 渡 辺 富 雄*

Influence of Corrosion Wastage on the Fatigue Strength of Fillet Welded Joints

by Michifumi Yuasa, *Member* Tomio Watanabe

Summary

Fatigue tests on fillet welded joints were carried out using test specimens simulating reduced plate thickness and reduced fillet weld due to corrosion wastage to investigate the influence of corrosion wastage on the fatigue strength of fillet welded joints. The results of the tests and the related studies are summarized below.

It was observed that in cruciform fillet welded joints, the tensile fatigue strength of test specimens with reduced plate thickness decreased considerably compared to the tensile fatigue strength of sound specimens. In side fillet welded joints, the shearing fatigue strength of test specimens with reduced plate thickness decreased considerably compared to the shearing fatigue strength of sound specimens. Stress analysis of test specimens was carried out using solid model. The maximum stress arised in the root of the fillet weld at the central part of the width of the plate in cruciform fillet welded joints, and also in the root of the fillet weld at the end of center side of the test specimen in side fillet welded joints. The position where the maximum stress arised almost coincided with the position where the crack occurred in fatigue tests.

Rules related to thickness of web plate and leg length of fillet weld of hold frames in large bulk carriers were amended in view of the marine casualties to these ships. From the results of fatigue tests, it was concluded that considerable improvement may be anticipated, as a result of the amendments to rules, in the fatigue strength of fillet welded joints in which corrosion wastage has progressed.

From the results of studies on measured data of plate thickness, it was observed that the variation in initiation life and progress rate of corrosion wastage in structural members of hull was considerable in several cases. Accordingly, it is very important to carry out timely maintenance after carefully studying and evaluating the status of corrosion wastage in order to prevent hull damage due to corrosion wastage.

1. 緒 言

ばら積貨物船及び油タンカー等の最近の重大海難事故に対して、原因の究明と防止対策のためにさまざまな視点からの調査・研究が行われている^{1)~3)}。それらの結果から、事故の原因としては船体構造の腐食衰耗の影響が大きいことが明らかにされた。腐食衰耗は船体の構造強度に直接的

に関わる基本的な問題であるが、船体損傷の統計資料⁴⁾によれば、損傷の原因として腐食衰耗がきわめて多い状況は変わっていない。船体構造部材の腐食衰耗が著しく進行すると部材の強度が低下して重大な事故につながることもあるため、腐食衰耗の実態ならびにその強度への影響を明らかにすることは重要な課題であると考えられる。

実船試験の応力データによる船体疲労強度の検討⁵⁾からわかるように、一般商船において、構造部材の疲労強度に大きく影響するレベルの応力が生じている時間は、その全運航時間と比較するときわめて短いと考えられる。腐食衰耗の進行と疲労被害の累積の関係については、腐食衰耗が問題となる場合の実態としては、その過程の大部分では

* (財)日本海事協会

腐食衰耗だけが進行していると考えられる。したがって、現実の運航状態における構造部材の疲労強度の検討を行う場合には、腐食衰耗による応力レベルの上昇及び応力分布の変化が大きな要因となる。ここでは、船体構造の基本的な要素であるすみ肉溶接継手を対象として、その疲労強度に対する腐食衰耗の影響について実験的な検討を行った。

本研究では船体の腐食衰耗の実態を明らかにするためにばら積貨物船の板厚計測データ及び腐食衰耗による船体損傷事例の調査を行い、さらに、すみ肉溶接継手の疲労強度と腐食衰耗の関係について検討するために、模擬した腐食衰耗を有するすみ肉溶接継手の疲労試験及び応力解析等を行った。本稿ではこれらの結果をとりまとめて報告する。

2. 船体構造部材の腐食衰耗について

船体構造部材の腐食衰耗及び腐食衰耗による損傷の実態を把握するため、ばら積貨物船の板厚計測データ及び腐食衰耗による典型的な損傷事例について検討を行った。

2.1 ばら積貨物船の板厚計測データ

前報⁶⁾では大型ばら積貨物船のホールドフレームの板厚計測データについての調査結果を報告した。ここでは部内資料から新しいデータを追加して、若干の検討を行った。対象は大型ばら積貨物船のホールドフレーム下部の代表的な個所（ウェブ及びフェース）についての定期的検査時の板厚計測データである。腐食衰耗の発生寿命及び進行速度を精度良く推定するために、異なる船齢で（2回の）計測データが得られている12隻を選定して、ホールド毎に板厚計測データから腐食衰耗量の平均値を求めた。1ホールドあたりのデータ数は約20～50である。ここで、腐食衰耗は発生寿命 α で発生し、その後は一定の進行速度 β で進行するものと仮定している⁶⁾。計測された船齢 a_1 での衰耗量 t_1 及び船齢 a_2 での衰耗量 t_2 から、 $\alpha=(a_1t_2-a_2t_1)/(t_2-t_1)$ 、 $\beta=(t_2-t_1)/(a_2-a_1)$ として、腐食衰耗の2つのパラメータすなわち発生寿命 α 及び進行速度 β を推定した。

Table 1 Corrosion wastage at lower part of side frames of bulk carriers

Type of paint	No. of points	Initiation life α (years)		Progress rate β (mm/year)	
		Mean	S. Dev.	Mean	S. Dev.
Oily paint	60 (6)	7.58	3.16	0.576	0.228
Tar-epoxy paint	51 (9)	7.41	2.20	0.275	0.196
Others	17 (2)	6.31	2.17	0.914	0.261

Figures in () indicates the No. of ships

調査結果から腐食衰耗の発生寿命及び進行速度の平均値及び標準偏差を Table 1 に、その分布を Table 2 に示す。腐食衰耗の発生寿命及び進行速度には大きなバラツキがあることがわかる。また、油性塗料とタールエポキシ塗料を比較すると、発生寿命については両者に有意な差はみとめられないが、一方、腐食衰耗の進行速度についてはタールエポキシ塗料では油性塗料よりもかなり小さいことがわかる。タールエポキシ塗料の優れた防食効果はよく知られているが、現実には塗装の施工条件及び使用環境等の影響がかなり大きいと考えられる。特に溶接部では腐食は建造時から始まっており、腐食衰耗の発生後は塗膜及び腐食生成物の性質が進行速度に大きく影響するものと推定される。タールエポキシ塗料では塗膜が劣化してもエポキシ樹脂は強靱で剝離しにくいため、腐食衰耗の進行速度が比較的小さいものと考えられる。

Table 2 からわかるように、腐食衰耗の発生寿命と進行速度の間に全体的にはほとんど相関性がみとめられない。また、その詳細として、データ数の多い3隻の船について発生寿命と進行速度の関係を Fig. 1 に示しているが、油性塗料の A 船では正の相関性があることがわかる。すなわち油性塗料の場合は腐食衰耗の発生寿命と進行速度は補完的な関係にあると考えられる。

2.2 腐食衰耗による船体損傷事例

ここでは2.1とは別に、1988年以降10年間の船体損傷に関する部内資料⁷⁾等の調査を行い、腐食衰耗に起因する

Table 2 Distribution of parameters of corrosion wastage

Oily paint	Initiation life α (years)							Total
	2	4	6	8	10	12	14	
Progress rate β (mm/year)	1.2				2			2
	1.05			1	2		1	4
	0.9		1	4	3			8
	0.75		1	7	3	1	3	16
	0.6	1	3	4		2	4	13
	0.45		1	4				7
	0.3			4		2		10
	0.15			4		1	4	10
Total	5	20	8	11	7	9		60
Tar-epoxy paint	Initiation life α (years)							Total
	2	4	6	8	10	12	14	
Progress rate β (mm/year)	1.2							
	1.05							
	0.9			1				1
	0.75			2	1			3
	0.6			1	2	4		7
	0.45		1	2	1	3		6
	0.3	1	5	6	4		2	18
	0.15		6	6	2	1	1	16
Total	1	12	19	12	4	3		51

Fig. 1 Correlation of parameters of corrosion wastage

と考えられる典型的な船体損傷事例について、損傷時の運航状況及び部材の腐食衰耗状態等の概要をとりまとめた。

事例1 船側外板及び船底外板の大規模破断，鉱石運搬船，162,500 dwt，船齢 15 年

鉄鉱石を積載してペルー沖を南下中に、暴風に巻き込まれて右舷から B. S 11~12 の激しい風をうけて大きな船体運動を繰り返していたが、波浪衝撃により右舷 No.1 WBT の船側外板及び船底外板が破断して大破口を生じた。タンク内のストラットより下では部材の状態は悪く、特にサイドロンジは腐食衰耗がかなり進行していた。

事例2 横置水密隔壁の崩壊，ばら積貨物船，140,000 dwt，船齢 15 年

荷役中に港内用のバラストホールド (No. 4) に制限値を大きく超えたバラスト水が漲られて、船尾側のコルゲート水密隔壁の中央部から右舷舷側近傍までの部分が崩壊して脱落した。調査結果から、水密隔壁の一部では衰耗限度を超えて腐食衰耗が進行しており、これが損傷の大きな要因であることがわかった。

事例3 上甲板の垂下：油タンカー，28,500 dwt，船齢 16 年

No. 2 & 3 COT/WBT 及び Mid. WBT の上甲板及びデッキロンジが一様に腐食衰耗してすみ肉溶接部がほとんどなくなり、デッキロンジが上甲板から離脱していた。これらのタンクではバラストを積載するため、上甲板の裏側は高温多湿となり腐食衰耗が進行したものと考えられる。なお、デッキロンジの自由端はナイフエッジ状になっていた。

事例4 船側外板の破断及び凹損，ばら積貨物船，124,200 dwt，船齢 13 年

鉄鉱石を積載して南アフリカ沖を航行中に、発達中の低気圧に遭遇して左舷 No. 1 Hold の船側外板にき裂を生じて浸水した。ビルジホッパー上端部から外板にき裂が生じ、さらにそのき裂が前後方向に進展して、外板が広範囲にわたって破断した。その他複数のホールドにおいてもほぼ全てのホールドフレームが局損し外板に凹損を生じていた。本船は船齢の割にはホールドフレームの腐食衰耗がかなり進行しており、衰耗限度程度のレベルであった。

事例5 船側外板のき裂によるホールド浸水，木材運搬船，6,900 dwt，船齢 18 年

荒天に遭遇して、No. 1 Hold の船側外板の数個所に水平き裂を生じてホールドに浸水した。ホールドフレーム下端のブラケットが著しく腐食衰耗し、内底板とのすみ肉溶接部が破断して外板のき裂損傷に至ったものである。損傷の主な原因はブラケットの腐食衰耗及び荷役時の貨物によるダメージであるが、木材運搬船ではこのような損傷事例は少なからず報告されている。

これらの損傷事例に関して、船体の保守管理及び運航操船という視点から若干の考察を行ったが、各事例に共通的であると考えられることは、(1)各船はいずれも高齢であり構造部材の腐食衰耗がかなり進行していたが、結果として必ずしも十分な修理は行われていなかった、(2)荒天に遭遇してあるいはバラストの過積載等により大きな荷重がはたらき船体が厳しい応力状態にさらされた、(3)荒天避航あるいは慎重な操作等により損傷を回避できた可能性もうかがえること、等である。なお、これらの損傷事例に関連する技術的な事項については、すでに構造規則あるいは検査規則等の改正により必要な対策がとられている。

船体構造部材の腐食衰耗の発生及び進行については塗装の種類及び施工条件、使用環境条件、貨物の物理的・化学的性質、荷役による機械的損傷等のさまざまな影響因子が考えられる。したがって、腐食衰耗による船体損傷を防止するためには、常にその実態を的確に把握・評価して適切なメンテナンスを行うことが重要となる。

3. すみ肉溶接継手の疲労試験

すみ肉溶接継手の疲労強度に対する腐食衰耗の影響について実験的に検討するため、腐食衰耗による板厚及びすみ肉溶接部の減少を模擬した試験片の疲労試験を行った。

3.1 すみ肉溶接の寸法について

すみ肉溶接の寸法については、多くの研究の成果^{9)~11)}にもとづいて、のど断面の平均応力を溶接部の応力とみなして各継手形式及び荷重形式等に対して規定されている。船体構造部材では、主としてすみ肉溶接の引張り強度及びせん断強度が検討対象となる。一般に、主板とウェブとの溶接部及び面材とウェブとの溶接部ではせん断強度が問題となり、十字継手溶接部ではせん断強度及び引張り強度が問題となる¹¹⁾。また、すみ肉溶接部の損傷については主と

して部材の端部及び応力集中部に生じる傾向があり、これらの個所では引張り力が大きいと考えられる。船級協会の構造規則ではすみ肉溶接については母材板厚に対して脚長あるいはど厚比を規定している^{(12),(13)}。また、船体構造部材の腐食衰耗については、その重要度を考慮して部材毎に許容衰耗量が定められている^{(例え(14))}。

高齢大型ばら積貨物船に関する調査¹⁾では、一連の損傷の原因として、腐食衰耗によりホールドフレームのウェブあるいはブラケットの板厚及びすみ肉溶接部が減少して、フレームと船側外板あるいはブラケットとホッパー斜板等のすみ肉溶接部が破断し、フレームが船側構造から離脱してその防撓効果が失われることが指摘されている。これをうけて同構造の健全性を確保するために、防食上の観点からホールドフレームのウェブ板厚及びすみ肉脚長についての規則改正が行われた。この改正により、従来の平均的なウェブ板厚 11 mm 及びすみ肉脚長 4 mm (軽連続溶接 F2 として) が、ウェブ板厚 13 mm 及びすみ肉脚長 7 mm (連続溶接 F1 として) となった。今回の疲労試験では、この規則改正の成果を検証することも考慮した。

3.2 試験片及び試験方法

すみ肉溶接継手の引張り疲労試験用として (荷重伝達型) 十字すみ肉継手の試験片を、また、せん断疲労試験用として側面すみ肉継手の試験片を製作した。試験片の形状及び寸法等を Fig. 2 及び Fig. 3 に示す。これらは文献⁽⁸⁾及び JIS Z 3132 を参考にしている。十字すみ肉継手の試

Fig. 2 Specimen for tensile fatigue test (Cruciform fillet welded joint)

験片は板厚、溶接脚長及び板厚減少量を変えた 6 種類、側面すみ肉継手の試験片は溶接脚長及び板厚減少量を変えた 6 種類とした。なお、試験片の板厚及び溶接脚長は 3.1 に述べたウェブの板厚及び溶接脚長に対応している。Table 3 及び Table 4 に各試験片の溶接脚長及び板厚減少量等を示す。板厚減少量については一様衰耗に対する許容衰耗量等⁽¹⁴⁾を参考にして定めた。すみ肉溶接部の表面からの

Fig. 3 Specimen for shearing fatigue test (Side fillet welded joint)

Table 3 Specimens for tensile fatigue test

Symbol	Thickness of main plate (mm)	Thickness of attached plate (mm)	Leg length of fillet weld (mm)	Ratio of wear down (%)	Number of specimens
T-1	11.0	20.0	4.0	0	5
T-1A	11.0	20.0	4.0	30	5
T-2	13.0	20.0	5.0	0	5
T-3	13.0	20.0	7.0	0	5
T-3A	13.0	20.0	7.0	15	5
T-3B	13.0	20.0	7.0	30	5

Table 4 Specimens for shearing fatigue test

Symbol	Thickness of main plate (mm)	Thickness of attached plate (mm)	Leg length of fillet weld (mm)	Thickness of wear down (mm)	Number of specimens
S-1	20.0	20.0	4.0	0.0	5
S-1A	20.0	20.0	4.0	1.65	5
S-2	20.0	20.0	5.0	0.0	5
S-3	20.0	20.0	7.0	0.0	5
S-3A	20.0	20.0	7.0	0.98	5
S-3B	20.0	20.0	7.0	1.95	5

減少量については、溶接金属は一般に母材と比較して成分的高品位であり耐食性もあることを考慮して、実測データ等から板厚減少量の70%とした。

試験片は板厚11, 13及び20mmの船体用32キロ級高張力鋼(TMCP鋼, KA32)の鋼板を用いて、溶接及び機械加工により製作した。母材及び溶接金属の化学成分をTable 5に、機械的性質をTable 6にそれぞれ示す。また、試験片製作時の溶接条件をTable 7に示す。母材は黒皮付き、板厚及びすみ肉溶接減少部は機械加工仕上げ、健全な試験片は溶接ままである。

試験片の両端部に引張り荷重を加えて、すみ肉溶接継手の引張り疲労試験及びせん断疲労試験を行いその破断寿命を求めた。試験条件は、応力比Rは0.1, 荷重繰返し速度は10 Hz, 荷重波形はサイン波とした。なお、試験機は容量50トンのサーボ型疲労試験機を用いた。

3.3 試験結果

今回の疲労試験では、試験片はすべてすみ肉溶接のど付近からき裂が生じて溶接ビードが破断した。引張り疲労試験においては、健全な試験片はほぼどの断面(45°)の近傍で破断したが、板厚減少した試験片では応力状態の変化により破断面は水平に近くなった。せん断疲労試験においては、試験片はすべてほぼどの断面の近傍で破断した。引張り及びせん断疲労試験で破断した試験片のうちから、

破断面の一例をPhoto 1及びPhoto 2にそれぞれ示す。

十字すみ肉継手の引張り疲労試験から、健全な試験片と板厚減少した試験片の試験結果を比較してFig. 4に示す。ここで、応力範囲は両者とも健全な試験片のすみ肉溶接部のだ断面の公称応力を用いており、板厚減少の影響は考慮していない。板厚減少した試験片の引張り疲労強度は健全な試験片と比べてかなり低下している。

側面すみ肉継手のせん断疲労試験から、健全な試験片と板厚減少した試験片の試験結果を比較してFig. 5に示す。ここで、縦軸の応力範囲については引張り疲労試験の場合と同様である。試験結果にはバラツキがあるが、全般的には、板厚減少した試験片のせん断疲労強度についても健全な試験片と比べてかなり低下している。

引張りとせん断の疲労曲線を比較すると、せん断の方が疲労強度レベルが高く、また、疲労曲線の勾配が小さいことがわかる。したがって、せん断疲労強度に対しては高いレベルの応力だけが影響すると考えることができる。

すみ肉溶接継手の疲労強度については、一般に溶接脚長の影響があると考えられる。ここで、脚長の異なる健全な

Table 5 Chemical composition of material and weld metal

Thickness (mm)	Grade	Chemical composition (wt. %)									
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	Al
11.0	KA32	0.15	0.32	1.02	0.016	0.002	0.01	0.02	0.02	0.002	0.25
13.0	KA32	0.15	0.35	1.07	0.022	0.003	0.02	0.02	0.02	0.001	0.26
20.0	KA32	0.15	0.35	1.07	0.022	0.003	0.02	0.02	0.02	0.001	0.26
Weld metal		0.05	0.45	1.35	0.013	0.009					

Table 6 Mechanical properties of material and weld metal

Thickness (mm)	Grade	Yield point (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)
11.0	KA32	387	510	27
13.0	KA32	390	523	24
20.0	KA32	398	514	26
Weld metal		510	570	30

Table 7 Welding conditions of test specimens

Symbol of specimens	Welding method	Weld rod	Welding current(A)	Welding voltage(V)	Welding speed(mm/m)
T-1,1A	CO ₂ semi-auto	DW-100 φ 1.4	190	24.5	730
T-2					420
T-3,3A,3B					200
S-1,1A	CO ₂ semi-auto	DW-100 φ 1.4	190	24.5	340
S-2					250
S-3,3A,3B					190

Photo 1 Fracture surface of tensile test specimen

Photo 2 Fracture surface of shearing test specimen

(a) Specimens T-1 and T-1A

(b) Specimens T-3, T-3A and T-3B

Fig. 4 Results of tensile fatigue test

(a) Specimens S-1 and S-1A

(b) Specimens S-3, S-3A and S-3B

Fig. 5 Results of shearing fatigue test

試験片の試験結果をとりまとめて Fig. 6 に示す。溶接脚長が大きくなるにしたがって疲労強度が若干低下する傾向がみとめられる。この要因としては溶接金属の冶金的性質、応力分布等の差異が影響するものと考えられる。

4. 試験片の応力解析

各種類の試験片についての応力解析を行い、疲労試験の結果と応力解析の結果を比較して板厚の減少が疲労強度に及ぼす影響について検討した。

4.1 解析モデル

十字すみ肉継手及び側面すみ肉継手の健全な試験片及び板厚減少した試験片について、ソリッド要素モデルによる FEM 弾性応力解析を行い、すみ肉溶接部及びその周辺の応力を求めた。解析モデルは試験片の形状及び荷重の対称性を利用して 1/8 構造モデルとした。解析モデルの一例を Fig. 7 に示す。構造要素は四面体要素を用いて最小要素長さは約 1.8 mm とした。荷重条件は、のど部断面の平均公称応力 50 N/mm² に相当する引張り荷重を、疲労試験

(a) Tensile fatigue strength

(b) Shearing fatigue strength

Fig. 6 Effect of leg length on fatigue strength of fillet welded joints

(a) Cruciform fillet welded joint

(b) Side fillet welded joint

Fig. 7 Examples of FEM model for stress analysis of test specimens

と同様に試験片の両端部に加えた。

4.2 解析結果

十字すみ肉継手では、すみ肉溶接のルート部から主板側止端部にかけての範囲には比較的高い応力が生じている。すみ肉溶接ルート部には応力集中がみとめられ、最大応力は板幅中央のルート部に生じている。一方、側面すみ肉継手では、すみ肉溶接部の全体的な応力レベルは比較的低いが、溶接ルート部には局部的に大きな応力集中がみとめられる。また、最大応力は試験片中央側の溶接端ルート部に

生じている。これらの最大応力の位置は、疲労試験におけるき裂発生位置とほぼ対応していると考えられる。

各種類の試験片についての解析結果から、すみ肉溶接部の最大応力（ミーゼス）と疲労試験の結果から求めた 5×10^5 回疲労強度とを対比させて Fig. 8 に示す。ここで、最大応力についてはすみ肉脚長 4 mm の健全な試験片 T-1 あるいは S-1 の値を 1.0 とする相対値で表している。なお、T-1 の最大応力は 188 N/mm^2 、S-1 は 498 N/mm^2 である。引張り及びせん断のいずれの場合もすみ肉溶接部

Fig. 8 Relation of maximum Mises stress and fatigue strength of test specimens

の最大応力が上昇するにつれて疲労強度が低下する傾向がみとめられる。

5. 考 察

5.1 すみ肉溶接継手の腐食衰耗と疲労強度について

疲労試験の結果から、すみ肉溶接部のど断面の公称応力について考えると、板厚減少した試験片の疲労強度は健全な試験片と比べてかなり低下することが示された。ここで試験片の板厚及びすみ肉溶接部の減少による応力レベルの上昇を考慮して、減少したすみ肉のど断面の実応力による疲労試験結果の検討を行った。T-1及びS-1では板厚及びすみ肉脚長が減少すると、実応力で考えると疲労強度はやや上昇している。一方、T-3及びS-3では板厚及びすみ肉脚長が減少すると、疲労強度は低下しておりその量は公称応力の場合の約半分位である。

応力解析の結果から、最大応力と疲労強度の対応関係が示されたが、十字すみ肉継手では板厚減少による応力分布の変化及び応力レベルの上昇の影響が大きく、側面すみ肉継手では応力分布の変化は小さいが局部的な高応力が疲労強度に影響していると考えられる。なお、いずれの試験片においても疲労き裂はすみ肉溶接ルート部から発生しているため、すみ肉溶接の表面を機械加工したことの影響は少ないと考えられる。

5.2 部材寸法及びすみ肉溶接脚長について

大型ばら積貨物船のホールドフレームについては、腐食衰耗に関連した規則改正により、ウェブの板厚及びすみ肉溶接の脚長が増加した。しかし、ホールドフレームの寸法は断面係数で規定されるため、実績としてウェブの板厚は

Table 8 Equivalent fatigue strength of joints for 5×10^5 cycles

Model	Plate thickness (mm)	Wear down (mm)	Leg length (mm)	Fatigue strength of fillet weld (N/mm ²)	Equivalent fatigue strength of joint (N/mm ²)
T-1	11.0	0.0	4.0	147	76
T-1A	11.0	3.3	4.0	97	50
T-2	13.0	0.0	5.0	140	90
T-3	13.0	0.0	7.0	127	114
T-3A	13.0	1.95	7.0	93	83
T-3B	13.0	3.9	7.0	73	66
S-1	11.0	0.0	4.0	217	111
S-1A	11.0	3.3	4.0	161	83
S-2	13.0	0.0	5.0	169	108
S-3	13.0	0.0	7.0	154	139
S-3A	13.0	1.95	7.0	112	101
S-3B	13.0	3.9	7.0	88	79

増加したがフレームスペース及びフェースの寸法はあまり変化していない。したがって、規則改正の前後でウェブの受け持つ荷重は変わらないとすると、ウェブの応力は板厚の逆比で低下することになる。疲労試験の結果から、すみ肉溶接部の 5×10^5 回疲労強度及び応力低下の影響を考慮して換算したウェブの（すみ肉継手としての）等価な 5×10^5 回疲労強度をとりまとめて Table 8 に示す。この規則改正により 5×10^5 回引張り疲労強度について健全な継手（T-1 → T-3）では 50%，腐食衰耗が進行した継手（T-1 A → T-3 A 及び T-3 B，但し衰耗量を 3.3 mm として比較）では 42% の強度の向上がみとめられる。また、 5×10^5 回せん断疲労強度については健全な継手（S-1 → S-3）では 25%，腐食衰耗が進行した継手（S-1 A → S-3 A 及び S-3 B，但し衰耗量を 3.3 mm として比較）では 3% の強度の向上がみとめられる。

船体構造の健全性を維持するためには、腐食衰耗に関連する保守管理が重要であることは十分に認識されている。しかし、現実の問題としては保守管理は業界の景気変動の影響を受けやすく不確定要因が多いと考えられる。また、船体構造には保守点検がかなり困難な箇所も少なくない。このため腐食衰耗の防止対策としては、必ずしも全面的に保守管理に頼ることはできないと考えられる。船体構造の健全性の確保という観点からは、重要であるが保守点検が容易ではない部材については、その寸法及び溶接脚長等を増加させることが確度の高い手段であると考えられる。

6. 結 語

船体構造の基本的な要素であるすみ肉溶接継手に関して腐食衰耗による板厚及びすみ肉溶接部の減少を模擬した試験片の疲労試験及び応力解析等を行い、すみ肉溶接継手の疲労強度に対する腐食衰耗の影響について検討した。その結果をまとめると以下の通りである。

(1) 引張り荷重をうける十字すみ肉溶接継手では、板厚

が減少すると健全な継手と比べて引張り疲労強度がかなり低下することがわかった。また、せん断荷重をうける側面すみ肉溶接継手についても、板厚が減少すると健全な継手と比べてせん断疲労強度がかなり低下した。

(2) すみ肉溶接継手の引張り疲労強度とせん断疲労強度を比較すると、せん断疲労強度の強度レベルはかなり高く、その疲労曲線の勾配は緩やかであることがわかった。また、溶接脚長が大きくなるとすみ肉溶接継手の疲労強度は若干低下する傾向がみとめられた。

(3) 各試験片の応力解析結果から、十字すみ肉継手では板幅中央のすみ肉溶接ルート部に、側面すみ肉継手では中央側のすみ肉溶接端のルート部に最大応力が生じることがわかった。これらの箇所は、疲労試験におけるき裂の発生位置とほぼ対応していると考えられる。

(4) 海難事故に関連して、大型ばら積貨物船のホールドフレームのウェブ板厚及びすみ肉溶接脚長についての規則改正が行われたが、今回の疲労試験結果から、すみ肉溶接継手（ウェブ）の疲労強度に関しては規則改正によりその等価な疲労強度がかなり向上することが示された。

(5) 板厚計測データについての調査結果から、船体構造物材の腐食衰耗の発生寿命及び進行速度には大きなバラツキがあることがわかった。このため、腐食衰耗による船体損傷を防止するためには常にその実態を的確に把握・評価して、適切なメンテナンスを行うことが重要となる。

本研究の実施にあたり、データ収集及び応力解析等についてご協力を頂いた本会情報技術部ならびに技術研究所の関係各位に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 検査技術部：高齢大型ばら積貨物船に関する調査—高齢大型ばら積貨物船調査会報告から—, 日本海事協会会誌, No. 219 (1992)
- 2) 在田正義：船舶・海洋構造物の鋼板の衰耗について—ナホトカ号事故に関連して—, 材料と環境, Vol. 46, No. 9 (1997)
- 3) 矢尾哲也, 角 洋一, 竹本博安, 熊野 厚, 末岡英利, 大坪秀臣：ナホトカ号事故時の構造強度の推定, 日本造船学会論文集, 第 183 号 (1998)
- 4) 情報技術部：1995 年度の船体損傷のまとめ, 日本海事協会会誌, No. 240 (1997)
- 5) 湯浅通史：実船試験の応力データによる船体疲労強度の検討, 日本造船学会論文集, 第 173 号 (1993)
- 6) 湯浅通史, 渡辺富雄：腐食した溶接継手の疲労強度について, 日本造船学会論文集, 第 176 号 (1994)
- 7) 日本海事協会：船体損傷関係の部内資料 (1988~1997)
- 8) 日本海事協会：船体すみ肉溶接脚長研究委員会報告書, (1964)
- 9) 横強度小委員会 WG：すみ肉溶接継手の脚長決定に関する調査報告[1]~[3], 日本造船学会誌, No. 595, 597 及び 598 (1979)
- 10) 中村宇八郎, 福沢光男, 矢田敏夫：すみ肉溶接継手の適正寸法に関する研究, 石川島播磨技報, 第 16 巻, 第 5 号 (1976)
- 11) 木曾 孝, 道行隆夫, 長尾俊二, 好川睦也, 宮崎精治：すみ肉溶接脚長の合理的設計法, 川崎技報, 第 62 号 (1976)
- 12) 日本海事協会：鋼船規則 C 編船体構造及び船体艤装, (1996)
- 13) Lloyd's Register of Shipping: Rules and Regulations for the Classification of Ships, (1997)
- 14) Nippon Kaiji Kyokai: Thickness measurement standards for hull structural members, (1994)