船体用隅肉溶接部の静的強度に及ぼす腐食衰耗の影響

正員 松 下 久 雄* 正員 中 井 達 郎*
正員 山 本 規 雄*

A Study on Static Strength of Corroded Fillet Welded Joints for Ship Structures

by Hisao Matsushita, *Member* Taturo Nakai, *Member*
Norio Yamamoto, *Member*

Summary

Corrosion of structural members of ships is one of the main problems for ship safety. In this report static strength of corroded fillet welded joints for ship structure is investigated with experimental result using actual materials taken from old ships and corrosion-simulated specimens. Tensile strength, bending strength, parallel shear strength and normal shear strength of corroded fillet welded joints are obtained. Size-ratio of web-thickness to throat-thickness of weld-bead is an important factor for fracture mode, that is, web fracture and weld-bead fracture, of corroded fillet welded joints. And also failures of hold frames in bulk carriers are discussed with result of this study.

1. 結 言

経年船の腐食衰耗は船体の局部強度の低下のみならず全体強度の低下も招きかねない重要な問題である。経年バルクキャリア(BC)の腐食衰耗した船側ホールドフレームの横倒れ損傷やフレーム破断損傷、また、船側外板の凹損等の損傷事故が報告され、腐食衰耗によるフレーム材や隅肉溶接部の強度低下が問題になっている。特に、ホールドフレームのウェブと外板との隅肉溶接部は倉内の水分が落下する際の経路となりやすく腐食衰耗が先行する傾向が見られる。また、油タンカーの上甲板の腐食衰耗も船体全体の縦強度の減少を招くことから十分注意する必要がある。この船舶の経年使用による腐食衰耗に関する研究は、今までに多く行われており、例えば、経年船の腐食衰耗状態を詳細に調査した研究¹⁾、腐食ビットの発生挙動をシミュレートした研究²⁾、フレーム材の孔食による強度や延性の低下を明らかにした研究^{3),4)}等がある。

また、基礎的な隅肉溶接強度に関する研究では、古くから、太田、上田、佐藤、瀬尾らによる一連の強度評価法に関する研究⁵⁾や現在のNK規則の基礎となっている船体隅肉溶接脚長を決めるための剪断強度評価法に関する研究⁶⁾等がある。しかし、腐食衰耗した経年船での隅肉溶接部材や腐食衰耗を模擬した試験片を用いて、腐食衰耗した隅肉溶接継手部の静的強度特性(引張、曲げ、剪断)を詳細に調査した研究はあまり見られないようである。そこで、本論文では、腐食衰耗した隅肉溶接部の静的強度特性を明らかにした結果及び経年 BC のホールドフレームの損傷等を考察した結果を報告する。

2. 隅肉溶接部の腐食衰耗状態

経年船 8 隻(BC 7 隻, シングルハルトンカー(SHT)1 隻)について、BC ではホールドフレームからまた SHT ではデッキ部材から、各船の任意の位置で腐食衰耗した溶接部材サンプルを切り出してその隅肉溶接部の断面マクロを作製しその断面から腐食衰耗状態を調査した。

* (財) 日本海事協会 技術研究所

(a)BC6(12year)Fr. (b) BC2(14)Fr. (c)SHT1 (22) Deck
Photo 1 Examples of Corroded Fillet Welded Joint

Fig.1 Explanatory Figure of Corroded Fillet Welded Joint

Fig. 2 Relationship between Passed Time and Diminution of Corroded Fillet Welded Joints

船齢は、それぞれ6年から22年(BC1(10year), BC2(14), BC3(12), BC4(14), BC5(6), BC7(13), SHT1(22))である。尚、BCは主にYP32鋼を、SHT1は軟鋼を用いた隅

肉溶接継手である。代表的な断面写真をPhoto 1に示す。腐食衰耗の状態は、当然のことながら、その船舶の使用状況によるが、BCの船側フレームでの隅肉溶接部では水分の流れにより局所的に腐食衰耗が激しくなる傾向がある。一般にこの腐食形態を溝食"Grooving"と言う。ここに、腐食した隅肉溶接部の模式図をFig.1に示す。また、Fig.2に示すように、ばらつきは大きい、経年数が大きくなるほど腐食衰耗が進行している。図中にはウェブ片面の腐食衰耗速度が0.3, 0.2, 0.1mm/yearの線もプロットした。今回調査した船舶での腐食衰耗した隅肉溶接部の脚長 L とフレームウェブ板厚 W との関係は、Fig.3に示すように、 $L = \sqrt{2(W/2)} = W/\sqrt{2}$ にほぼ平行であることから、のど厚 $N(=L/\sqrt{2})$ の減少量 ΔN と片側ウェブ板厚の減少量 $\Delta W/2$ はほぼ等しいことがうかがわれる。ちなみに、のど厚と片側ウェブ板厚の各減少量が等しい($\Delta N = \Delta W/2$)として、 $\Delta L = \sqrt{2} \Delta N = \Delta W/\sqrt{2}$ を用いて、(1)式から建造時脚長 L_0 を想定した結果も同時にプロットした。

$$L_0 = L + \Delta W/\sqrt{2} \quad (1)$$

建造時の脚長 L_0 (図中の◆)はほぼNK規則の隅肉連続溶接F1を満足している(NK-F1以上)ことが分かる。

Fig.3 Relationship between web thickness and leg length of corroded fillet welded joints

3. 強度試験

Photo 1に示した各経年船(BC2, SHT1)の切り替え材で腐食衰耗した隅肉溶接継手から作製した試験片及びPhoto 2, Fig.4に示すようなYP32鋼手溶接で作製し

た腐食衰耗を模擬した試験片 (CPT) 等を用いて、常温での引張試験、曲げ試験、剪断試験 (溶接線の法線方向 ($\perp$)、溶接線に平行方向 ($//$)) を行った。Fig. 5 参照。Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 にそれぞれ各試験片を、また、photo 3, Photo 4, Photo 5, Photo 6 にそれぞれ代表的な各試験後の試験片の大変形または破断状態を示す。ここに、腐食模擬試験片は、経年腐食による溶接金属の静的強度の変化等金属学的な腐食の影響は特に考慮せず、腐食衰耗による隅肉溶接部の形状のみを模擬して切削加工したものである。

Fig. 4 Explanatory Figure of Simulated Specimen of Corroded Fillet Welded Joint (CTP)

(a) Corrosion-simulated Test Specimen (CTP) (b) Building Test Specimen

Photo 2 Test Piece (TP) Specimens

Fig. 5 Explanatory Figure of Applied Load Direction at Corroded Fillet Welded Joint

Fig. 6 Tensile Test Specimen

(a) BC2 ($\alpha=0.74$) (b) TP ($\alpha=1.34$)
Fracture at Web Plate Fracture at Weld Bead
Photo 3 Tensile Test Specimen after Test

Fig. 7 Bending Test

(a) SHT1 ($\alpha=0.51$) (b) TP ($\alpha=1.31$) (c) TP ($\alpha=1.46$)
Deformed at Web Plate Fracture at Weld Bead
Photo 4 Bending Test specimens after test

Fig. 8 Normal Shear Test Specimen

(a) SHT1 ($\alpha=0.36$) Deformed at Web Plate
 (b) TP ($\alpha=1.51$) Fractured at Weld Bead

Photo 5 Normal Shear Test Specimens after Test

Fig. 9 Parallel Shear Test Specimen

(a) SHT1 ($\alpha=0.37$) Fracture at Web Plate
 (b) BC2 ($\alpha=0.67$) Fracture at Web Plate
 (c) TP ($\alpha=1.44$) Fracture at Weld Bead

Photo 6 Parallel Shear Specimen after Test

* : CTP, N : のど厚, W : ウェブ

Fig. 10 Test Results of Tensile Test, Bending Test and Shear Tests (Normal Shear and Parallel Shear)

ここに、 α はウェブ板厚 W とのど厚合計 $N_T (=N_1+N_2)$ の比 W/N_T である。これらの試験結果を纏めて、Fig.10 に α 値に対する各試験での静的強度(最大強度)を示した。また、静的強度は、後述の各強度計算式から求めた値である。試験後の試験片外観写真や Fig.10 から分かるように、 α 値即ちウェブ板厚 W とのど厚合計 N_T との関係が破断位置及び静的強度に影響を与えていることが分かる。

ここで、各強度計算式を示す。

① 引張強度、剪断強度(⊥)、剪断強度(//)

i) ウェブ破断の場合

$$P_f / (WB) \quad \text{---- (2)}$$

ii) 溶接ビード(のど厚)破断の場合

$$P_f / (N_T B) \quad \text{---- (3)}$$

② 曲げ強度

i) ウェブ破断の場合

$$4P_f S_0 / BW^2 / 2 \quad \text{---- (4)}$$

ii) 溶接ビード(のど厚)破断の場合

$$4P_f S_0 / \left(B \left((W_0 + N_T)^2 - W_0^2 \right) \right) \quad \text{-- (5)}$$

ここに、 P_f は最大荷重 (kN)、 S_0 は初期曲げスパン (mm)、 B は試験片板厚 (mm)、 W_0 はウェブ元板厚 (mm)、 W はウェブ板厚 (mm)、 N_T は試験片の溶接部のど厚合計 (mm)、 $N_T = N_1 + N_2$ 、 N_1, N_2 は個々のど厚 (mm) である。

ここで、曲げ強度は、Fig. 11(a) に示すような単純片持ち梁で塑性断面係数 Z_p を用いて計算したが、ウェブ崩壊の場合、塑性断面係数 Z_p をそのまま用いて計算した強度 σ_w は、Fig. 12 に示すように、 α が 1.4 で、(5) 式で計算される溶接のど厚部の強度 (σ_N) よりも約 2 倍大きな強度値を与えることが分かる。即ち、Fig. 11(b) に示すように、腐食衰耗した隅肉溶接部でウェブ破断する場合、実際の曲げスパン S は、初期曲げスパン S_0 よりも短くなることや三角形の隅肉溶接部の形状による応力集中により曲げ強度は減少するものと考えられる。従って、ウェブ崩壊の場合の曲げ強度計算には、 $\alpha = 1.4$ で $\sigma_w / \sigma_N = 1$ となるように、(4) 式のように塑性断面係数 Z_p を 1/2 倍した式を用いた。

この Fig. 10 から、腐食衰耗した場合も含め隅肉溶接継手の静的強度は、①引張強度 > 曲げ強度 > 剪断強度 (⊥) $\geq$ 剪断強度 (//)、また、②単純に引張と剪断ではウェブ板厚とのど厚合計の比 α がほぼ 1 以上になった時に溶接ビード破断するが、曲げでは約 1.4 以上になってから溶接ビード破断すること、が分かる。後者は、Photo 4 でも明らかのように、 α が 1.4 以下では、三角形になった腐食した隅肉溶接部内部に未溶着部が含まれ相対的にウェブの最小板厚部が未溶着部よりも大きな応力集中部分になるためと考えられる。尚、この応力集中の度合いは腐食溝幅の影響を受けるとわれ今後の検討課題のひとつである。Fig. 10 のように、軟鋼 (YP:280, TS:450 MPa)、YP32 鋼 (YP:320, TS:530MPa) 及び溶接材料による強度のばらつきはあるものの、各静的強度とも α 値が約 0.4 から 3.0 の範囲でほぼ同程度の値になる傾向が見られることは、腐食衰耗による金

(a) Building welded Joint

(b) Corroded Welded Joint

Fig.11 Explanatory Figure of Bending Test

Fig.12 Bending Test Result of Corrosion-simulated Test Specimens

属組織的な静的強度の変化は少ないことを示している。従って、腐食衰耗による隅肉溶接部のウェブ板厚や溶接部のど厚断面の減少が溶接部の局部強度の低下を引き起こすと言える。ここに、Fig. 10 中の、 α が 0.43 付近で剪断強度(⊥)が 260MPa 程度の値のデータは、ウェブ板厚は元板厚で隅肉溶接ビードのど厚を厚くした TP で得られた値である。

主に、極端に腐食衰耗した軟鋼隅肉溶接継手 (SHT1) のデータ (Fig. 10 中の点線で囲ったデータで引張強度、剪断強度(⊥)の関連線を引いている) ではあるが、 α が 1 程度以下の場合、剪断強度(//)以外の強度はばらつく傾向が見られる。この原因としては、以下の 2 点が

考えられる。前述のように、①隅肉溶接部が極端に腐食衰耗した場合、三角形になった隅肉溶接部の中に未溶着部が埋没するような形になり相対的に腐食衰耗したウェブ部分が弱くなることから、曲げ試験(Photo 4 参照)や剪断(⊥)試験(Photo 5 参照)では、このウェブ部分で大変形が進み崩壊に至ること、また、②引張試験では、Photo 7(a) に示すように、溶接ビードののど厚が左右で異なり、のど厚合計ではウェブ板厚より大きい場合($\alpha < 1$)でも、一方ののど厚 $N1$ が非常に小さい時には、この溶接ビードが先に破断し引き続き残りの溶接ビードが破断する2段階破断が発生する場合があること。これらの場合の強度は非常に小さくなる。さらに、Photo 7(b) に示すように、剪断強度(⊥)試験では、ウェブ板厚とのど厚合計とはほぼ同じ($\alpha \approx 1$)でも、荷重と反対側ののど厚 $N1$ が極端に小さい場合には、この溶接ビードでの破断が最初に低荷重で発生し、その後の荷重の増加は少なくて崩壊するケースが見られる。これらのケースは腐食衰耗が極端に進んだ場合の特殊なケースと思われるが十分注意する必要がある現象のひとつと考えられる。尚、NK 規則⁷⁾ のすみ肉連続溶接の F1 領域(α は 1.0~2.6 に相当)では溶接金属の強度が支配的なのど厚破断となる。

(a) Tensile Test Specimen

$N1 : N2 = 1 : 4$
SHT1 ($\alpha = 0.55$)

$N1 : N2 = 1 : 19$
SHT1 ($\alpha = 1.04$)

(b) Normal Shear Test Specimen

Photo 7 2-step Fracture of Corroded Specimens

4. 考 察

Fig. 13 に模式的に示すように、船体には、積み付け、運航条件や海象(波浪、水圧、風雨、海水)等により静的荷重または変動荷重が常に作用する。一方、経年船の場合、前述のように腐食衰耗による溶接部断面の減少はそのまま局部強度の減少に繋がることから、腐食衰耗が進行する場合、局部構造強度が限界に達し損傷が発生する場合がある。特に、鉱石や石炭を混載するバルクキャリア等では、ホールドフレーム等の船体の局部に腐食衰耗が集中する場合、溶接部等の断面減少に伴う局部強度の減少によるフレームの横倒れ損傷やフレームの破断損傷が発生することがある。ここに、Photo 8(a) のケースでは、外板とホールドフレームの隅肉溶接部での破断は見られないが、フレームが大きく曲げ変形したり横倒れしている。このケース(a)では、前述のように、腐食衰耗した隅肉溶接部が3角形状態になり未溶着部を含み、相対的に応力集中が大きくな

Fig.13 Basic Concept of Safety for ships

(a) Collapsed Hold Frames

(b) Fractured Hold Frames

Photo 8 Examples of Failure Corroded Hold Frames

Photo 9 Example of Corroded Part of Fillet Welded Joint at Upper Deck and L-BHD between Crude Oil Tank and Water Ballast Tank

った減肉したウェブ部分で破断せずに曲げられ、ウェブが横倒れの大変形を起こしてしまった可能性が考えられる。一方、Photo 8(b) の場合には、ウェブや隅肉溶接部の腐食衰耗が進み板厚や溶接のど厚が減少したことにより、ホールドフレームの剪断座屈の発生やウェブの引張荷重能力の低下による破断さらに隅肉溶接部が腐食衰耗したことによる同じく局所的な引張荷重に対する荷重能力の減少による外板からの剥がれにより大きく損傷したことが考えられる。

Photo 9 にシングルハルトンカー(船齢 14 年)の上甲板とロンジバルクヘッド接合部の隅肉溶接部の腐食例を示す。この場合、水バラストタンクと油タンクの腐食環境の違いにより、左右の隅肉溶接部のど厚は 1:2.5 であった。このケースのように、左右の隅肉溶接部のど厚が異なる腐食衰耗形態があることから、局所的な荷重状態との兼ね合いではあるが、前述のような特殊な局部強度の低下も検討する必要があるものと考えられる。腐食衰耗による局部強度の低下は腐食衰耗による溶接部断面の減少に起因していることから、このような損傷を防止するためには、鋼板の適正な腐食予備厚の設定や適切な溶接部溶け込み量の確保、切り替え基準の設定を行う必要がある。現在、船体各部の腐食条件を考慮した適切な腐食予備厚を検討中である。また、溝食等の腐食衰耗を考慮した切り替え基準⁷⁾を提案している。尚、船体の安全性を確保するためには、さらに、的確な検査及び十分なメンテナンスを行う必要がある。

5. 結 言

経年船の腐食衰耗した隅肉溶接継手の腐食衰耗状態を調査すると共に、腐食衰耗した隅肉溶接継手や腐食を模擬した試験片を用いた引張試験、曲げ試験、剪断試験(溶接線の法線方向、平行方向)を行い、腐食衰耗した隅肉溶接継手の静的強度特性を明らかにした。

その結果、腐食衰耗した隅肉溶接部では主に以下の特徴があることが分かった。

- (1) 隅肉溶接部のど厚減少量は、ウェブ板厚減少量の約 1/2 である。

- (2) 腐食衰耗した場合も含め隅肉溶接継手の静的強度は以下の順である。

引張強度 > 曲げ強度 > 剪断強度 (/) ≥ 剪断強度 (⊥)

- (3) 引張や剪断では、のど厚合計がウェブ板厚よりも小さい場合は溶接ビードで破断する。曲げでは、腐食衰耗した隅肉溶接部の形状の影響を受けて、ウェブ板厚が溶接のど厚合計の 1.4 倍以上で溶接ビード破断になる。

- (4) 極端に腐食衰耗が進展した場合は、特殊な崩壊形態がある。例えば、未溶着部は無視されウェブで曲げ崩壊するケース、引張荷重の負荷により 2 段破壊するケース、法線方向の剪断荷重に対して片側の溶接ビードが破断してそのまま低荷重で崩壊するケース等がある。

尚、ホールドフレームのウェブや隅肉溶接部での腐食衰耗が激しい場合、フレームの横倒れ、局部座屈、ウェブの破断、隅肉溶接部の剥がれ等を伴う損傷が発生することがある。これらを防止するためには、鋼板の適正な腐食予備厚の設定や適切な溶接部溶け込み量の確保、的確に腐食衰耗を考慮した切り替え基準の設定、さらに、的確な検査及び十分なメンテナンスを行う必要がある。

謝 辞

本研究に際し、船主、造船所及び N K シンガポール事務所の方々から貴重な資料を頂戴した。記してお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 例えば、恵美洋彦、湯浅通史、熊野厚、山本規雄他：船舶・海洋構造物の寿命評価に関する研究(第 1-3 報)、日本造船学会論文集、第 169, 172, 174 号、1991-1993
- 2) 例えば、的場正明、山本規雄、渡辺富雄、海野昌俊：船体の腐食・防食とその強度への影響に関する研究、日本造船学会論文集、第 175 号、1994, pp. 271-280
- 3) 松下久雄、中井達郎、山本規雄、荒井宏範：船体構造物材の静的強度に及ぼす腐食の影響(1 報)―実部材での腐食ピット影響調査―、日本造船学会論文集、第 192 号(2003)、pp. 256-365
- 4) 中井達郎、松下久雄、山本規雄、荒井宏範：バルクキャリア倉内肋骨の腐食実態と強度、検査技術、Vol. 9, No. 3 (2004)、pp. 38-43
- 5) 例えば、佐藤邦彦、瀬尾健二、曾根成典：引張を受ける十字すみ肉溶接継手の変形挙動と強度、溶接学会誌、第 41 巻、第 3 号、1972、pp. 22-34
- 6) 例えば、横強度小委員会 WG：報告「すみ肉溶接継手の脚長決定に関する調査報告[1]」、日本造船学会誌、第 595 号、1979, pp. 29-34
- 7) 日本海事協会鋼船規則 C 編、2004