

船体隅肉溶接部の静的強度に関する研究

—傾斜角度、部分溶込み、ギャップの影響—

正員 松下久雄* 正員 中井達郎*
正員 山本規雄*

A Study on Static Strength of Fillet Welded Joint for Ship Structure - Effect of Inclined Angle, Partial Joint Penetration, Gap -

by Hisao Matsushita, Member Tatsuro Nakai, Member
Norio Yamamoto, Member

Summary

The effect of inclined angle on static strength of fillet welded joint for inclined hold frame at forward and afterward hold is studied. In this study normal shear strength of the inclined fillet welded joint and inclined partial penetrated welded joint are mainly considered with experimental results and FEM analysis results. And the parallel shear strength of the inclined welded joint is also discussed.

The effect of gap depth of the fillet welded joint is quantitatively discussed and is considered about equivalency of the effect of grooving corrosion of the fillet welded joint for the parallel shear strength of fillet welded joint.

Key Words: Static Strength, Fillet Welded Joint, Inclined Angle, Partial Joint Penetration, Gap.

1. 緒言

船舶の経年使用時の安全性を確保するためには、船体構造部材の腐食衰耗による強度低下を正確に把握しておく必要があり、現在、孔食や溝食に関する研究を行っている^{1)~5)}。腐食部材の残存強度に関連する船体隅肉溶接部の基本的な静的強度に関し、さらに研究を行った。即ち、バルクキャリアの船首側や船尾側のホールドフレームでは、ウェブは傾斜して船側外板に隅肉溶接されることから、主に、傾斜した隅肉溶接部の静的強度に及ぼす溶接部の傾斜角度(θ)、部分溶込み溶接やギャップの影響について検討した。部分溶込み溶接やギャップについては、直角に取り付けられた隅肉溶接部に関して、多くの研究⁶⁾⁷⁾があるが、傾斜した隅肉溶接継手に関してはあまりないと思われる。尚、本報では、ウェブが横倒れするような横方向応力が作用し隅肉溶接部に局所的なせん断応力が発生する場合を想定して、特に、隅肉溶接継手の静的強度としては、溶接線直角方向のせん断強度と溶接線方向のせん断強度に注目した。

2. 溶接線直角方向のせん断強度

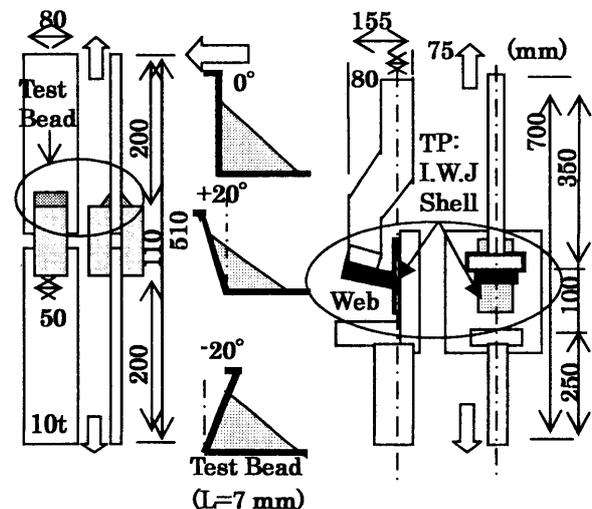
(1) 傾斜角度の影響

Fig.1 に示すような、溶接金属の純せん断試験片(Fig.1(a))と傾斜継手試験片(Fig.1(b))を、外板(板厚 19mm)、

* (財) 日本海事協会 技術研究所

原稿受理 平成17年 3月10日

ウェブ(板厚 13mm,一部($\theta=0^\circ$ の場合)20mm)にそれぞれ KA32 鋼板を用い手溶接(溶接材料 B17)で製作した。ここに、後者では傾斜継手の外板・ウェブをそれぞれ治具に固定して、溶接線に直角方向に引っ張ることにより傾斜継手の溶接ビードにせん断応力を発生させた。試験は室温で行った。前者の試験溶接ビードの傾斜角度は 0° (直角)、 -20° (直角よりも小さくなる方向)、 $+20^\circ$ (直角よりも大きくなる方向)の3種類とした。また、後者の傾斜角度は、 -30° から $+30^\circ$ までの範囲で変化させた。



(a) Weld metal (S-TP) (b) Inclined W.J. (I-TP)
Fig.1 Normal Shear Test Specimens

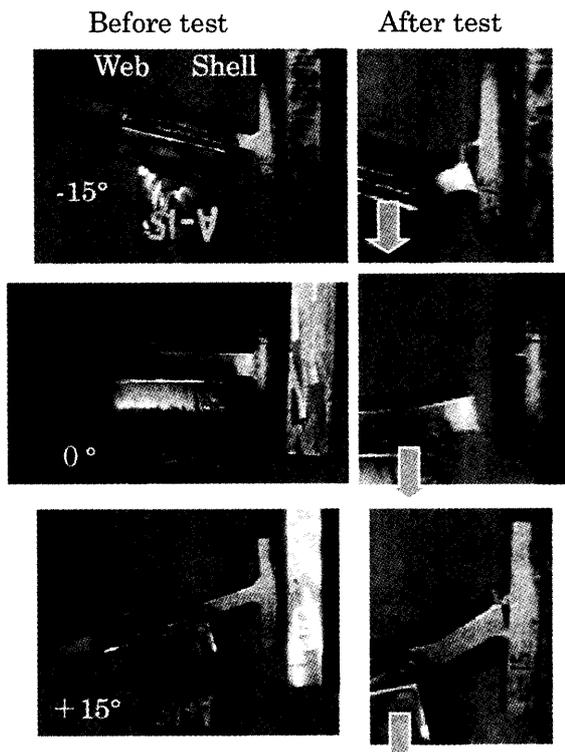
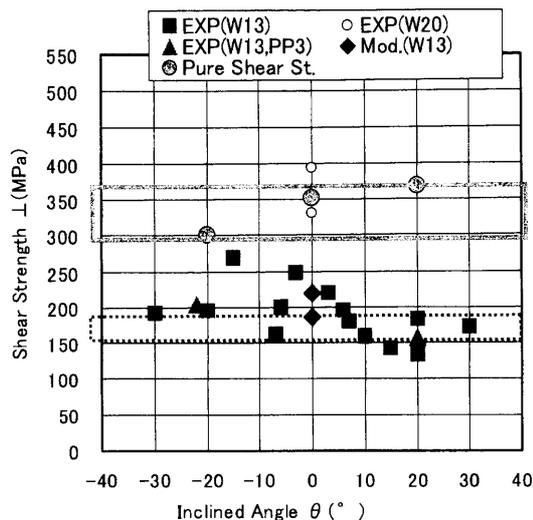


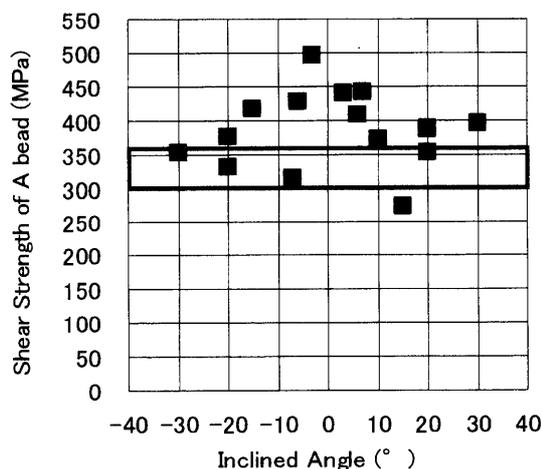
Photo 1 Nominal Shear Test Specimens (Before test and After test)

尚、試験溶接ビードの長さは 50 mm、のど厚は 4~7mm の範囲(目標脚長 7mm 目標のど厚 5 mm)である。

Photo 1 に示すように、傾斜継手は、傾斜角度が+、-に拘わらず、負荷と反対側の溶接ビードで破断した。この時に最大荷重に達した。溶接金属の純せん断強度は、Fig.2 に示すように、 -20° から $+20^{\circ}$ の範囲で 300~360MPa(平均 340MPa)であった。尚、隅肉溶接継手の引張強度(溶接のど厚で破断)は 430~550MPa(平均 480MPa)である¹⁾。傾斜継手試験片(傾斜角度 -30° から $+30^{\circ}$)で得られた溶接線直角方向せん断強度は、Fig.2 (1) に示すように、溶接部の合計のど厚で割った場合、純せん断強度の約 1/2 か若干大きくなること、また、Fig.2 (2) に示すように、負荷と反対側の破断した溶接ビードのど厚で割った場合、純せん断強度程度か若干大きくなること、また、それぞれ、傾斜角度の影響を受けることが分かった。Fig.3 に FEM 解析モデルを示す。FEM 解析では、ウェブ:13mm、のど厚:5mm とし、2次元弾塑性解析で、解析コード: MSC/Marc、要素: 2次元平面歪 4 節点四辺形要素、ヤング率: 205.8 GPa、降伏応力: 314 MPa(母材)、加工硬化無しとした。尚、溶接金属の降伏応力は母材と同じとした。また、溶接残留応力、溶接変形については考慮していない。Photo 1 に示したように、試験では外板を治具に溶接していることから、解析モデルでは外板の周りを拘束し、ウェブの負荷部分に分布荷重をかけた。この際、この負荷部分の節点の X 方向変位が等しくなるように保持した。Fig.4 に FEM 解析結果を示す。この Fig.4 から明らかなように、溶接ビードに局所的な曲げが負荷された場合には、①負荷と反対側の溶接ビード(溶接ビード A と記す)で大きな引張応力が発生すること、②直角に近いほど荷重側の



(1) Both Bead (Shear Strength calculated with total throat thickness of both bead(A),(B))



(2) Failed Bead (Shear Strength calculated with a throat thickness of failed bead(A))

Fig.2 Relationship between Normal Shear Strength and Inclined Angle

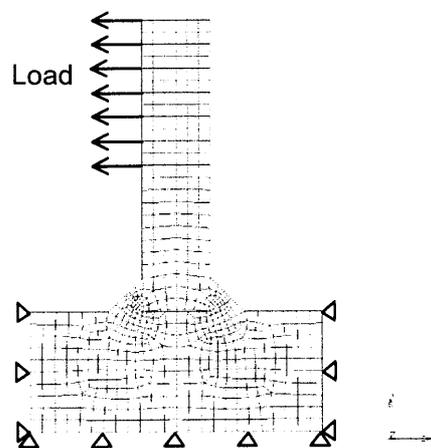
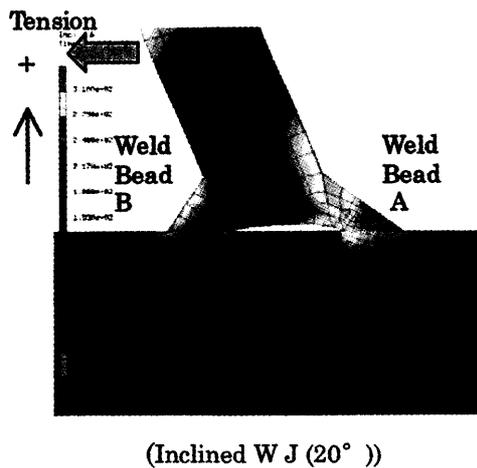
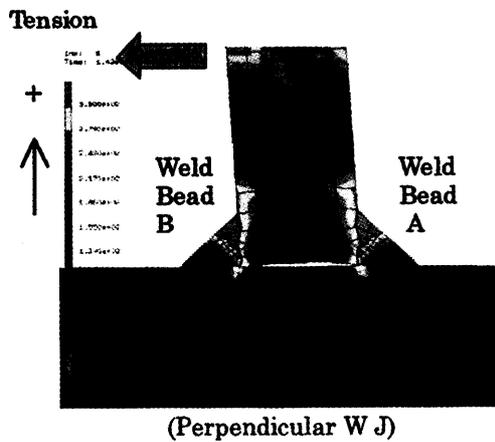
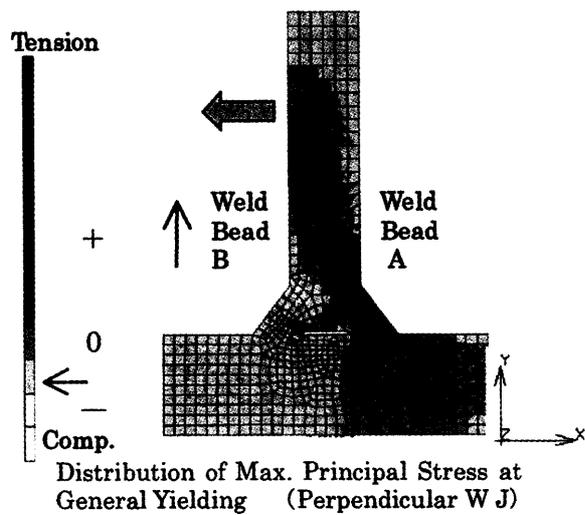


Fig.3 FEM model



Distribution of Equivalent Stress at General Yielding

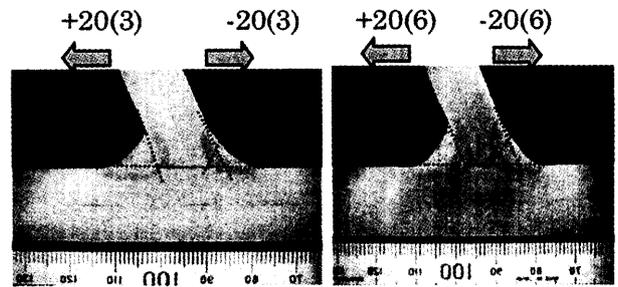
Fig.4 Stress Distribution of Fillet Welded Joints by FEM Analysis

溶接ビード(溶接ビード B と記す)の相当応力が大きくなりせん断強度が大きくなる事が分かる。この①から

「溶接ビード A で純せん断強度に達した時に溶接ビードは破断すること」、また、②から「傾斜角度が小さい場合には、溶接ビード A が純せん断強度に達する時点では、溶接ビード B の相当応力も大きくなることから溶接継手のせん断強度としては大きくなること」が推測される。さらに、溶接のど厚(5mm)他は同じにしてウェブ板厚(20 mm)のみを変えた FEM 解析を行い、結果を比較したところ「ウェブ板厚 13 mm の場合、ウェブは全面降伏する前に両側の溶接ビードが全面降伏する時の荷重は、ウェブ板厚 20mm の場合の 1/1.8」であることが分かった。このことから、ウェブ板厚 20mm の試験で得られたせん断強度(EXP (W20) ○)を 1/1.8 倍してウェブ板厚 13mm の場合を推定した結果を Fig.2 (1) 中に示した(Mod. (W13) ◆)。ほぼ $\theta = 0^\circ$ でのせん断強度を推定していることが分かる。

(2) 部分溶込みの効果

傾斜継手で、角度の大きい方の溶接ビードに部分溶込み



(a)PJPW:3mm

(b)PJPW:6mm

Photo 2 Inclined Welded Joints of Partial Joint Penetration Weld (PJPW)

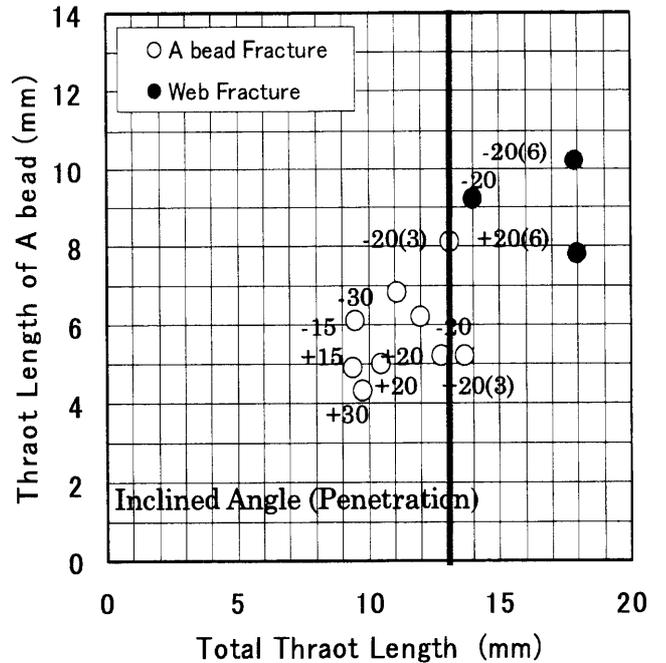


Fig.5 Fracture Mode Change by relationship between Thickness of Web Plate and Total Thickness of Throat of Fillet Weld

み溶接を行った場合の溶接線直角方向せん断強度特性を調べるために、Photo. 2 に示すように、傾斜角度の大きい方の溶接ビードにウェブ板厚(13mm)の約 1/4 (:3 mm),または約 1/2(:6 mm)の溶込み深さを持つ部分溶込みの傾斜継手を溶接し剪断試験を行った。試験片は、Fig.1(b)に示した傾斜継手試験片と同形とした。この試験溶接継手は、同じく、KA32 鋼を用いて手溶接(溶接材料 B17)で溶接した。Fig.5 に示すように、合計のど厚がウェブ板厚(13mm)よりも小さい場合は負荷と反対側の溶接ビード A (図中 A bead)で、大きい場合はウェブで、それぞれ破断することが分かった。ここに、Fig.6 に FEM 解析結果を示す。FEM 解析条件は Fig.3 と同じである。この Fig.6 から分かるように、ウェブが全面降伏しているときに、部分溶け込みが 3mm の継手(TP:+20(3))では溶接ビード A が全面降伏しているのに対し、部分溶込みが 6mm の継手(TP:+20(6))では全面降伏していない。即ち、ウェブが全面降伏する段階で溶接ビード A が全面降伏している場合に「溶接ビード破断」、全面降伏していない場合に「ウェブ破断」となるものと思われる。

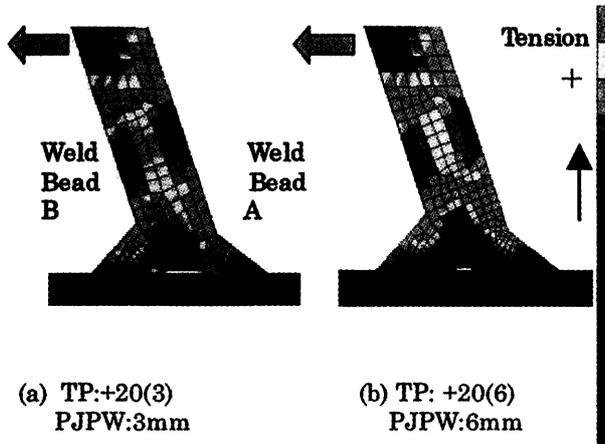


Fig.6 Stress Distribution of PJPW by FEM Analysis (PJPW 3mm, 6mm)

(3) ギャップの影響

傾斜継手のギャップの影響を調べるために、傾斜角度 10°, 15° の傾斜継手(A+10G, A+15G 試験片)について面取りをせずに溶接し剪断試験を行った。A+10 試験片はギャップ無しとするために面取りした。試験片は、Fig.1(b)に示した傾斜継手試験片と同形とした。この試験溶接継手は、同じく、KA32 鋼を用いて手溶接(溶接材料 B17)で溶接した。Table 1 に各隅肉溶接部の最小のど厚(MIN と記す)と見かけ上ギャップが無いとした場合のど厚(ST と記す)を、また、Photo 3 に各溶接継手の断面マクロ写真をそれぞれ示す。ギャップが大きい場合(A+15G)は、溶接金属の一部がギャップ内に入り未溶着部は小さくなっている。Table 2 に、破断荷重(最大荷重 Pmax)及び最大荷重を MIN または ST で割った値 σ_{max} (MIN), σ_{max} (ST)を示す。 σ_{max} (MIN)は、ギャップが有る場合の方が大きくなっている。これは、各試験片は溶接ビード A の未溶着部から破断したが、必ずしも溶接ビード A の MIN と同じ断面では無く若干傾いた面(Photo 2 中の図の F)であったことによる。 σ_{max} (ST)はギャップがある場合も、無い場合と同程度となった。

今回の実験結果では、ギャップによる傾斜継手のせん断強度の低下は見られなかったが、安全側を考えると、日本鋼船工作法精度基準 JSQS -1999⁷⁾ の”仕上げ：部材の隙間、板と骨材の隙間仕上げ、骨材が板に斜めに取付く(開先無)の許容限界は 3mm 以下”を用いるべきかと考える。

Table 1 Measurements of Inclined Welded Joints

TP No.	Throat (mm)					
	n1		n2		n1+n2	
	MIN	ST	MIN	ST	MIN	ST
A+10	4.7	4.6	4.7	3.4	9.4	8.0
A+10G	4.8	4.8	3.7	3.4	8.5	8.2
A+15G	4.6	5.3	3.6	4.0	8.2	9.3

Web thickness : 13mm,
Web width : 50mm

Table 2 Normal Shear Strength of Inclined Welded Joints

TP No.	I Angle (°)	Gap (mm)	Pmax (kN)	σ_{max} (MPa)	
				MIN (/A+10)	ST (/A+10)
A+10	10	-	63.5	135 (1.00)	159 (1.00)
A+10G	10	2.2	77.5	183 (1.35)	189 (1.19)
A+15G	15	3.4	73.5	179 (1.33)	158 (1.00)

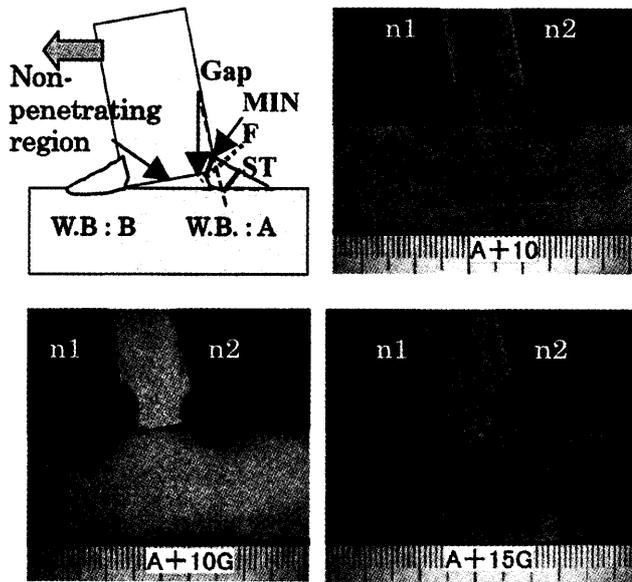


Photo 3 Sectional View of Inclined Welded Joints

3. 溶接線方向のせん断強度

(1) 傾斜角度の影響

溶接線方向と平行に負荷された時のせん断強度は、基本的に隅肉溶接部の傾斜角(θ)に無関係である。また、前報¹⁾で示したように、両側の溶接ビードのど厚が同じ場合、溶接線方向のせん断強度は両側のど厚の全断面積で決まる。このことから、傾斜継手の場合も、両側のど厚が極端に違わなければ、溶接線方向のせん断強度は、同じく両側のど厚の全断面積で決まると言える。

ここでは、傾斜継手の両側のど厚を直角継手のど厚(N0)と同じにするための脚長の計算式を検討した。

①傾斜角が+側(溶接ビード A)の場合には、溶接ビード A のど厚は、その溶接脚長を直角継手の脚長(L0)と同じにした場合、直角継手のど厚よりも小さくなる。

そこで、この傾斜継手ののど厚を直角継手ののど厚と同じにするためには、幾何学的に、Fig.7 に示すように、脚長(L)を式(1)で修正する。

$$L = (1/\sqrt{2} / \sin(\phi/2)) L_0 \quad \dots (1)$$

ここに、L₀は直角継手の脚長、φはπ/2-θ。
式(1)から、L/L₀は、θが+10°で1.10、+20°で1.23と計算される。尚、式(1)の溶接脚長Lを用いた場合、L₀の場合よりもど厚が増加する分、溶接ビードAの溶接線直角方向のせん断強度も若干増加することになる。

②傾斜角が一侧(溶接ビードB)の脚長をL₀とした場合には、逆にのど厚は若干増加するが、直角継手ののど厚と同じなる脚長を求めるには、傾斜角が+側と同様に、式(1)を用いて計算することが出来る。式(1)から、L/L₀は、θが-10°で0.92、-20°で0.86と計算される。

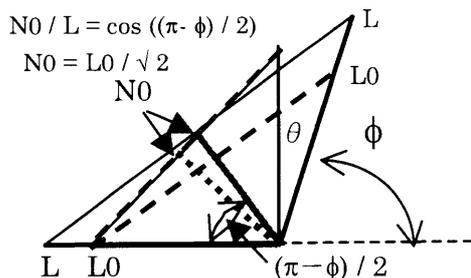


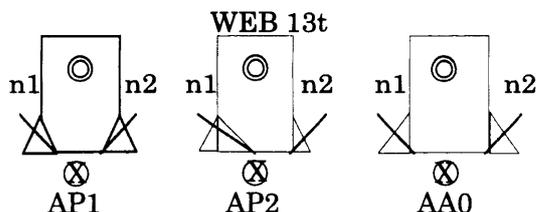
Fig.7 Idea of same length of throat thickness at Large angle bead of Inclined Welded Joint as that of Perpendicular Welded Joint

(2) 部分溶込みの影響

溶接線方向のせん断強度に及ぼす部分溶込みの効果を調べるために、Table 3 に示すような溶込み深さを持つ直角継手を溶接し剪断試験を行った。試験片の全形は、Fig.1(b)に示した傾斜継手試験片と同形としたが、試験部の溶接ビードは荷重方向と同じ方向とした。この試験溶接継手は、同じく、KA32 鋼を用いて手溶接(溶接材料B17)で溶接した。部分溶込み溶接継手(AP1,AP2 試験片)及び隅肉溶接継手(AA0 試験片)とも、合計のど厚がウェブ板厚よりも小さい(n1+n2<13mm)。ここに、n1,n2は各のど厚。これらの試験片は、溶接ビードで破断し、Table 3 に示すように、溶接線方向せん断強度は、ほぼ同程度であった。即ち、合計のど厚が同じならば隅肉溶接も部分溶込み溶接も同じ強度であることが分かる。

Table 3 Parallel Shear Strength of Welded Joints of Fillet Weld and Partial Joint Penetration Weld

TP No.	Throat (mm)			Pmax (kN)	σ max (MPa)
	n1	n2	n1+n2		
AP1	5.5	5.0	10.5	154	293
AP2	8.5	3.0	11.5	165	287
AA0	4.5	4.5	9.0	133	296



(3) ギャップの影響

溶接線方向のせん断強度に及ぼすギャップの影響を調べるために、Table 5 に示すようなギャップを持つ直角継手を溶接し剪断試験を行った。試験片の全形は、Fig.1(b)に示した傾斜継手試験片と同形としたが、試験部の溶接ビードは荷重方向と同じ方向にした。この試験溶接継手は、同じく、KA32 鋼を用いて手溶接(溶接材料B17)で溶接した。Table 4 に各溶接部のど厚を、また、Photo 4 に溶接継手の断面マクロ写真をそれぞれ示す。各試験片は、両溶接ビードのほぼ最小のど厚(MIN)部付近で破断した。Table 5 に示すように、最小のど厚での溶接線方向せん断強度σ max (MIN)は、ギャップ量に拘わらずギャップの無い場合と同程度であったが、隅肉溶接部の見かけ上のど厚での強度σ max (ST)は、ギャップ量の増加とともに低下した。ここに、σ max (ST)で

Table 4 Measurements of throat of Welded Joints of Fillet Weld

TP No.	Throat (mm)					
	n1		n2		n1+n2	
	MIN	ST	MIN	ST	MIN	ST
AA0	4.5	4.0	4.5	3.7	9.0	7.8
AA1G	4.4	4.4	5.8	4.0	10.2	8.3
AA3G	2.7	3.6	5.6	4.8	8.3	8.4
AA5G	4.2	6.4	4.0	6.7	8.2	13.2

Web thickness : 13mm,
Web width : 50mm

Table 5 Gap Effect on Parallel Shear Strength of Welded Joint of Fillet Weld

TP No.	Gap (mm)	Pmax (kN)	σ max (MPa)	
			MIN (/AA0)	ST (/AA0)
AA0	-	133	296 (1.00)	343 (1.00)
AA1G	1.0	143	280 (0.95)	343 (1.00)
AA3G	2.6	122	294 (0.99)	290 (0.85)
AA5G	5.2	126	307 (1.04)	192 (0.56)

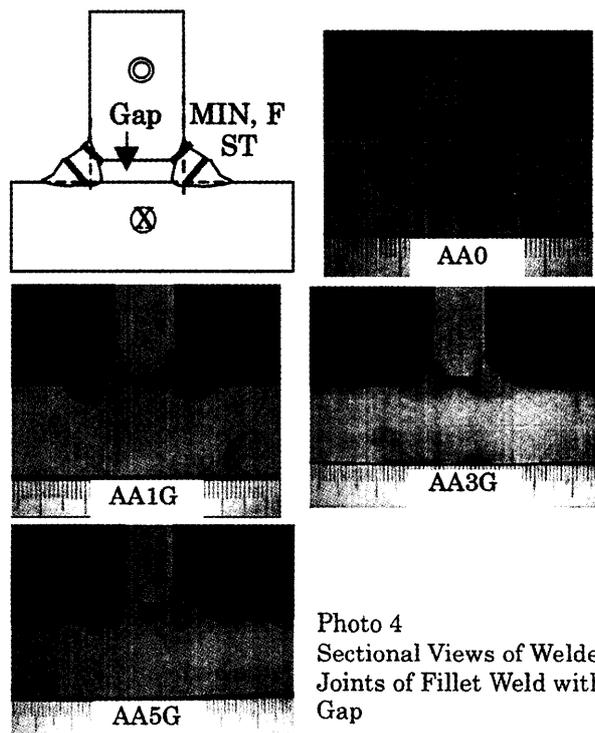


Photo 4 Sectional Views of Welded Joints of Fillet Weld with Gap

考えた場合、日本鋼船工作法精度基準 JSQS-1999⁷⁾の”仕上げ：取付精度、取付時の隙間仕上げの標準は 2mm 以下、許容限界は 3mm “は、隅肉溶接部のギャップが無い継手の強度よりも 1~2 割程度小さい継手強度になっていることが想定される。

4. 考察

船体構造部材の隅肉溶接部には、溶接継手試験片での負荷様式とは異なる負荷が掛かり、複雑な応力状態になることが想定される。Fig.8 に示すように、船首側や船尾側のホールドフレームでは、ウェブが船体外板に対して傾斜していることから、水圧によりウェブが横倒れする方向の負荷成分が発生することが想定され、また、この横方向の負荷成分によりウェブの隅肉溶接部に曲げモーメントや横方向のせん断荷重が負荷されことになる。ここで、周りの拘束条件や腐食衰耗の進行の状態により、ウェブが外板に対して剛体的変形するような状態や隅肉溶接部近傍の外板の曲げ変形が拘束されるような状態では、隅肉溶接部に横方向のせん断荷重が極端に負荷されることになるが、隅肉溶接部のせん断強度は、最悪の場合、船体中央部の直角継手の約 1/2 になることが予想されることから、最悪の場合、溶接ビードの破断が考えられる。この隅肉溶接部のせん断強度を増加させるためには、角度の大きい方の溶接ビードのど厚を増加させることや理想的には隅肉溶接部の合計のど厚をウェブ板厚以上とすることが有効であると考えられる。また、トリッピングブラケットを取り付け横倒れを防止

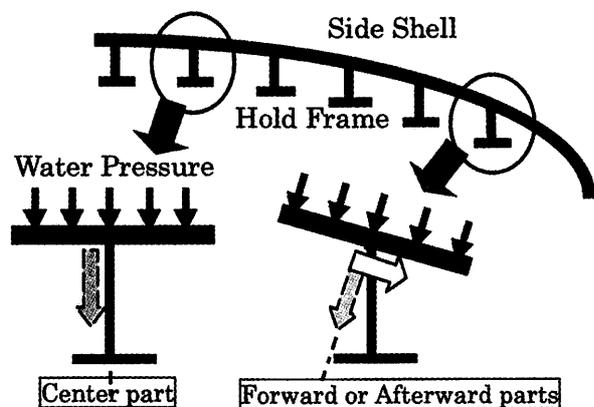


Fig.8 Ideal Figures of Hold Frames at Center part and Forward or Afterward parts of ship

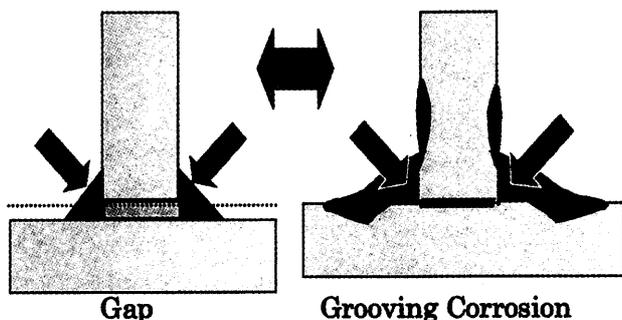


Fig.9 Model of Equivalence between Gap and Corrosion of Fillet Welded Joint

することも重要である。尚、Fig.9 に示すように、溶接線方向のせん断強度を考えた場合、ギャップが有る場合も溝状腐食が有る場合と同様、最小のど厚で決まることが分かる。

5. 結言

船体隅肉溶接部の静的強度に関する研究の一環として、隅肉溶接部の静的強度(せん断強度)に及ぼす傾斜角度の影響、部分溶込み溶接の効果、ギャップの影響について検討した。外板(板厚 19mm)、ウェブ(板厚 13mm)に KA32 鋼板を用い手溶接(溶接材料 B17)で溶接し、溶接金属の純せん断試験片と継手試験片を製作し、室温でせん断試験を行った。また、FEM 解析も行った。

その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 直角継手に対して角度 -30° から $+30^{\circ}$ の範囲で傾斜した隅肉溶接継手の溶接線直角方向せん断強度は、ウェブが傾斜した影響を受け、極端な場合、両側溶接された隅肉溶接継手の純せん断強度の約 1/2 になった。
- 2) 傾斜継手の角度の大きい方の溶接ビードに部分溶込み溶接を行った場合も含め、傾斜継手で溶接線直角方向に負荷された場合、溶接部の合計のど厚がウェブ板厚よりも小さい場合は負荷と反対側の溶接ビードで、また、大きい場合はウェブ鋼板でそれぞれ破断した。
- 3) 傾斜した隅肉溶接部の溶接線直角方向負荷に対して、傾斜角 15° 程度(端部開口量は 3.4mm)までのせん断強度は、ギャップの無い場合と同程度になった。
- 4) 直角継手の隅肉溶接部にギャップがある場合、最小のど厚での溶接線方向せん断強度はギャップ量に拘わらずギャップの無い場合と同程度であったが、隅肉溶接部の見かけ上のど厚での強度では、ギャップ量の増加とともに低下した。

参考文献

- 1) 松下、中井、山本：船体隅肉溶接部の静的強度に及ぼす腐食衰耗の影響、日本造船学会論文集、第 195 号、2004、pp.291 - 297
- 2) 松下、中井、山本：船体隅肉溶接部の静的強度に及ぼす腐食衰耗の影響、平成 15 年度 ClassNK 研究発表会講演集、pp49-58
- 3) 松下、中井、山本、荒井：船体構造部材の静的強度に及ぼす腐食の影響(第 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、2002、pp357 - 365
- 4) 中井、松下、山本、荒井：バルクキャリア倉内肋骨の腐食実態と強度、日本海事協会誌、第 262 号、平成 15(I)、2003、p.27-34
- 5) 中井、松下、山本、荒井：船体構造部材の静的強度に及ぼす腐食の影響(第 2 報)-人工ピット材を用いた強度調査-日本造船学会講演論文集、2003、pp27-28 他
- 6) 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 595 号、1979、pp.29-34 他
- 7) JSQS-1999「日本鋼船工作法精度標準 1999 版 船殻関係」日本造船学会工作法研究委員会