

船体隅肉溶接部の曲げ圧縮強度に及ぼす溝状腐食の影響 (第2報)

—自立型防撓材の場合—

正員 松下久雄* 正員 中井達郎*
正員 山本規雄*

Effect of Grooving on Static Strength of Fillet Welded Joint for Ship Structure under Compressive Stress Condition applied by bending moment (2nd Report)

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

Summary

Corrosion of structural members of ships is one of the main problems for ship safety.

In this report effect of grooving on static strength of corroded fillet welded joints for ship structure is investigated with experimental result and FEM analysis. Four points bending (4PB) test was conducted with T-shape specimen (TSS) without bracket plate against lateral deflection of web plate and the test result was compared with 4PB test result using a half size model specimen of hold frame of Cape-size bulk carrier (SMS). It is mainly obtained that in case of grooving in compressive stress region applied by bending moment, at fillet welded joint, maximum load occurs at lateral deflection of web plate and grooving width and grooving depth effects maximum load. There is no precise difference between 4PB test result with TSS and that with SMS. There is precise effect of inclined angle (20°) on the maximum load and is a little effect of Face-shape on it.

Words: Fillet Welded Joint, Corrosion, Grooving, Local Strength of Ship Structure, Static Strength

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る。現在、溝状腐食(グルーピング)や孔食に関する研究を行っている^{1)~5)}。前前報¹⁾では、経年船の溝状腐食した溶接継手等の試験片を用いた静的強度試験を行い、溝状腐食した隅肉溶接部の、単純引張、単純せん断、単純曲げ応力状態での静的強度を求めるとともに、腐食衰耗による金属組織的な静的強度の変化は少なく、溝状腐食した溶接継手の静的強度は、溶接金属やウェブの残存断面積でほぼ決ること等を明らかにした。即ち、溝状腐食による隅肉溶接部の静的強度を検討するには、溶接部に機械加工等による溝を有する試験片を用いた検討が有効であることが分かった。また、前報²⁾では、“船体隅肉溶接部の曲げ圧縮強度に及ぼす溝状腐食の影響”について、断面積が1/4となるケープサイズバルクキャリア倉内肋骨の1/2部分構造モデル試験体でウェブの支点に横倒れ拘束用ブラケットがある場合 (Fig. 1参照)の四点曲げ試験結果を報告した。本報では、引き続

き、長いホールドフレームの中間部分等を想定したウェブの両端部を拘束していない自立型防撓材の場合 (Fig. 2参照)の曲げ圧縮強度に及ぼす溝状腐食の影響について検討した。

主な検討項目は以下である。

- ① 溝状腐食の程度の影響：溝深さ、溝幅
- ② ウェブの傾斜角度の影響： 20° (一例として)
- ③ フェイス形状の影響：T型(両側)、L型(片側)

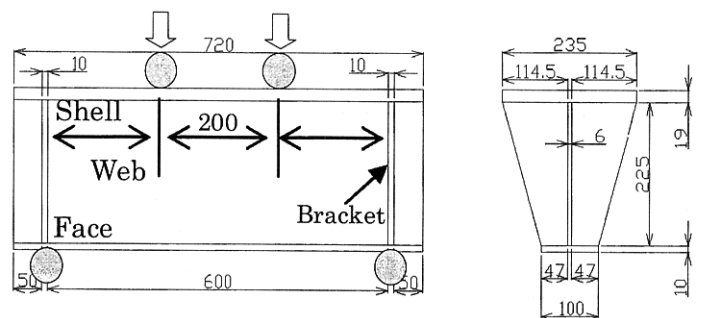


Fig. 1 Small Model Specimen (SMS)²⁾

* (財)日本海事協会 技術研究所

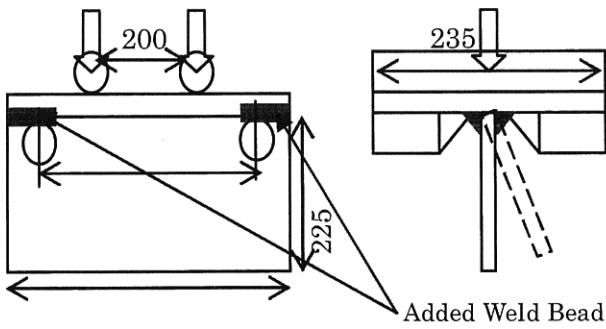


Fig. 2 T-Shape Specimen (TSS)

2. 試験体

本報では、前報²⁾と同様に、外板(板厚 19mm)、ウェブ(板厚 6mm)、フェイス(板厚 10mm)に KA32 鋼板を用い、溶接材料 B17 の手溶接で隅肉溶接を行い、Fig.2 に示したような T 字型の試験体を製作した。この試験体の外板部分を 4 点曲げることにより、外板とウェブの隅肉溶接部及びウェブの面外変形抵抗を求めた。ここに、外板とウェブの隅肉溶接は連続溶接で、基本溶接脚長(L₀)は 4 mm とした。溝付試験体の場合、機械切削・グラインダー加工で隅肉溶接部に溝加工を行い、目標脚長(L)を得た。溝幅(W)は、ウェブと外板で同じで、6, 15, 30, 60 mm (W/T₀ = 1, 2.5, 5, 10)とした。また、外板、溶接金属部、

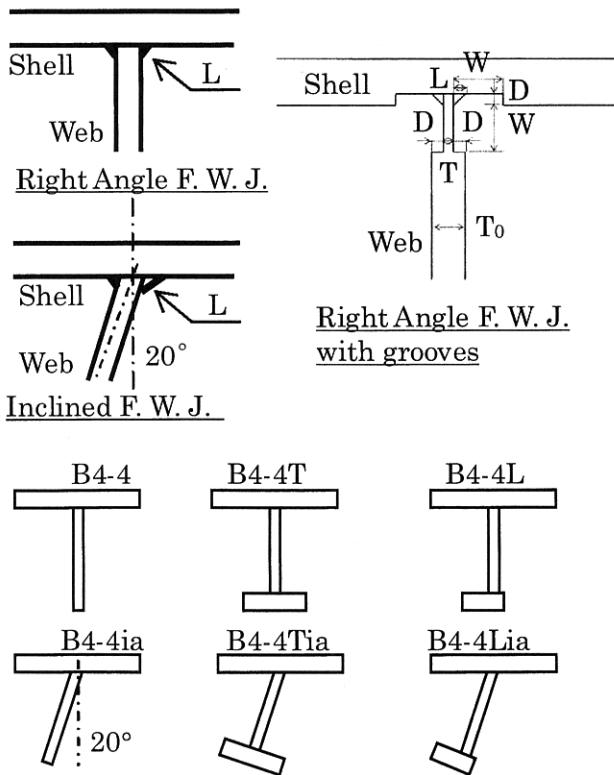


Fig.3 Definition of specimens

ウェブとも同じ溝深さ(D)に加工した。従って、模擬腐食部分のウェブ板厚(T)は、ウェブの元板厚(T₀)から 2D を引いた値である。この溝部分のウェブの板厚(T)は、元板厚の 75% (4.5mm) (L75)と 50% (3mm) (L50)の 2 種類とした。隅肉溶接部の形状は形取り材で確認した。尚、ウェブの元板厚が 6mm で隅肉溶接の元のど厚(N₀)が約 3mm であることから、α 値(ウェブ板厚÷溶接のど厚合計)は 1 である。溶接のど厚もウェブと同様に減少していることから、α 値は常に 1 である。本報では、ウェブの傾斜角度の影響を調べるための傾斜角度は 20° のみとした。フェイスは、両側に張り出した T 型(幅 100mm)、片側だけの L 型(幅 56mm)とした。Fig. 3 参照。

ここに、試験体 No.の添え字は、T: 両側フェイス、L: 片側フェイス、ia: 傾斜継手をそれぞれ示す。各試験体の溝形状は、実験結果と共に Table 1 にまとめて示す。

3. 実験

3. 1 実験方法

実験は、100 トン試験機を用いて 4 点曲げ試験とし、室温で行い、荷重(P)ー荷重点変位(H_L)関係、荷重ーウェブ端部付近の横方向変位(H_w)関係を計測した。Photo 1 参照。

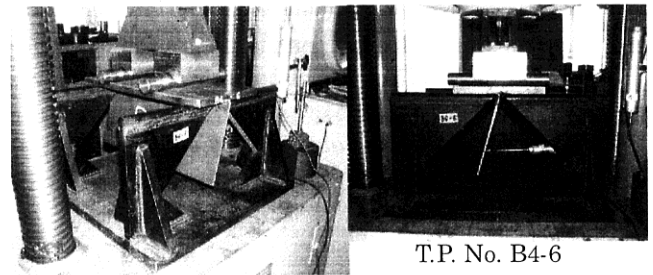


Photo 1 4 points bending test with T-shape specimen

3. 2 実験結果

試験体は負荷とともに上下方向に変形し、ウェブの外板側で面外横変形(局部座屈)が発生して、最終強度(最大荷重)時に、さらに急激にウェブの面外横変形は進行し、荷重は減少していった。各試験体の P-H_L関係、P-H_w関係を Fig.4 と Fig.5 に、また、各試験体の実験結果は、Table 1 にまとめて示す。

ここに、Fig.4 では、溝幅、溝深さの影響及び傾斜角度の影響を、また、Fig.5 では、特にフェイスの影響を示している。Photo 2 に一例として試験体 No.B4-1 の試験後の試験体全体変形状態を、Photo 3 に代表的な試験体の中央部分の断面写真を、それぞれ示す。試験後にウェブが面外変形していることが分かる。Photo3 の試験体 No. B4-3 のように、溝端部(白矢印)とウェブの面外変形屈曲点(黒矢印)が一緒になるのは溝幅が元板厚の 5 倍以上(W/T₀ = 5, 10)の試験体 B4-3 と B4-6 シリーズ、B4-7 シリーズである。

尚、隅肉溶接部での大きな面外変形は見られない。

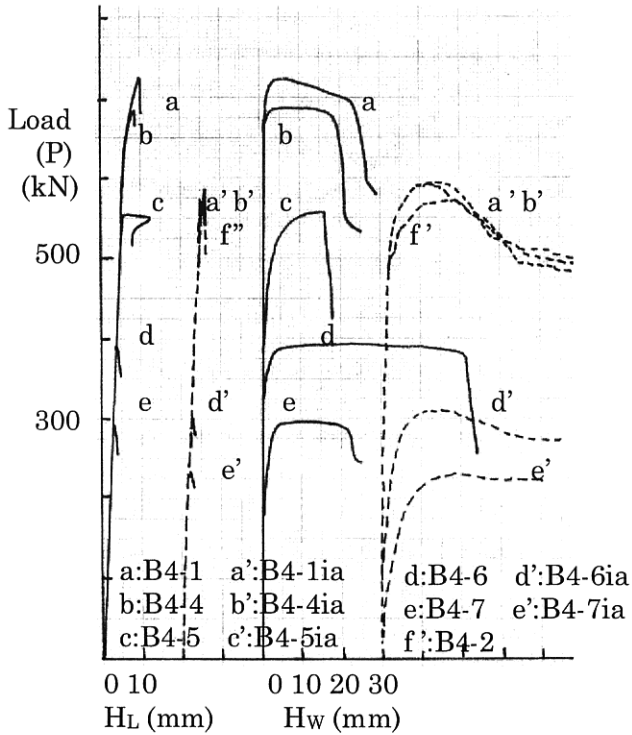


Fig. 4 Load(P)-vertical deflection(HL) curves and load(P)-lateral deflection(Hw) curves (The effect of W/T₀ and the effect of inclined angle)

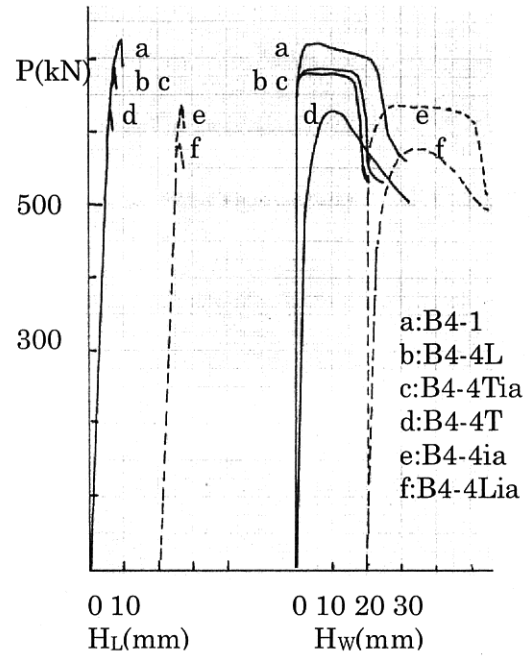


Fig.5 Load(P)-vertical deflection(HL) curves and load(P)-lateral deflection(Hw) curves (The effect of Face)

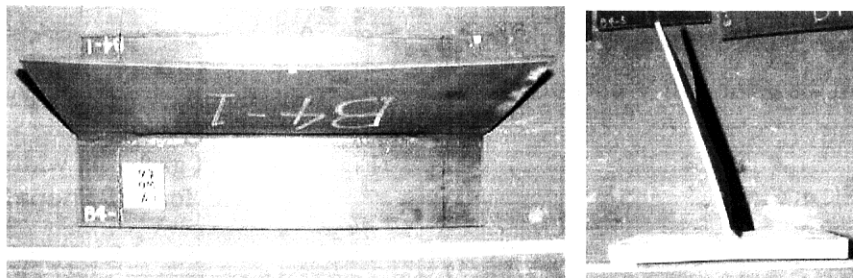


Photo 2 Specimen after test (T. P. No. B4-1)

Table 1 Dimensions of Groove and test results

TP No.	Inclined Angle	Face	Groove					L (mm)		Max. Load				
			D	W	T	W/T ₀	T/T ₀			Pmax (kN)	Hpm (mm)	Pmax	Hpm	
			(mm)				(%)							
1	B4-1	-	0	0	6	0	100	4	Base	719	9.9	1.000	1.000	
2	B4-2	-	0.75	15	4.5	2.5	75	3	Effect of D,W	633	7.6	0.880	0.768	
3	B4-3	-	0.75	30	4.5	5	75	3		613	5.2	0.853	0.525	
4	B4-4	-	1.5	6	3	1	50	2		684	7.6	0.951	0.768	
5	B4-5	-	1.5	15	3	2.5	50	2		553	5	0.769	0.505	
6	B4-6	-	1.5	30	3	5	50	2		389	4	0.541	0.404	
7	B4-7	-	1.5	60	3	10	50	2		291	3	0.405	0.303	
8	B4-4L	20°	L	1.5	6	3	1	50	2	Effect of Face	679		0.944	
9	B4-5L	20°	L	1.5	15	3	2.5	50	2	502		0.698		
10	B4-4T	20°	T	1.5	6	3	1	50	2	627		0.872		
11	B4-1ia	20°	-	0	0	6	0	100	4	Effect of Inclined Angle	579	7	0.805	0.707
12	B4-2ja	20°	-	0.75	15	4.5	2.5	75	3		568	5.2	0.790	0.525
13	B4-4ia	20°	-	1.5	6	3	1	50	2		581	5.4	0.808	0.545
14	B4-6ia	20°	-	1.5	30	3	5	50	2		303	2.3	0.421	0.232
15	B4-7ia	20°	-	1.5	60	3	10	50	2		227	3.1	0.316	0.313
16	B4-4Lia	20°	L	1.5	6	3	1	50	2		576		0.801	
17	B4-5Lia	20°	L	1.5	15	3	2.5	50	2	505		0.702		
18	B4-4Tia	20°	T	1.5	6	3	1	50	2	632		0.879		

Pmax = Max. Load
Hpm = Deflection at Pmax

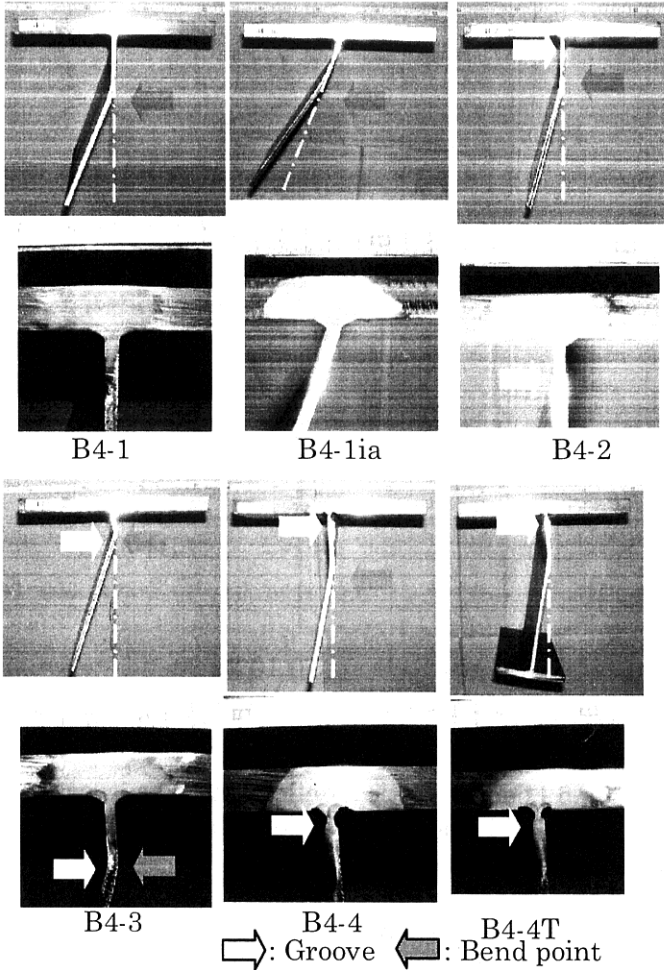


Photo 3 Sectional views of center part of tested specimens

主な実験結果を以下に示す。

1) 溝幅、溝深さの影響

Fig. 6 に最大荷重比と溝幅との関係を、また、Fig. 7 に最大荷重時変位と溝幅との関係を、それぞれ溝幅を横軸に示す。Fig. 8, Fig. 9 にそれぞれ前報²⁾ で得られた同じく最大荷重比や最大荷重時変位と溝幅との関係を示す。これらの図から、自立型の場合(Fig. 2 参照)も前報²⁾ のウェブに横倒れ拘束がある場合(Fig. 1 参照)と同様、溝幅が大きくなると最大荷重、最大荷重時変位とも急激に減少することが分かる。ここに、自立型の場合も以下に示す前報²⁾ の条件と同様のことが予測される。

(i) 例えば、建造時強度の 75%以上を確保する条件は、“溝部板厚が建造時の 75% (L75)で、 $W/T_0 < 10$ 、50% (L50)で、 $W/T_0 < 3$ ”

(ii) 例えば、建造時(L100%, W_0 mm)の 50%以上の最大荷重時変位を確保するには、“溝部板厚が、50%(L50)ではウェブ板厚に対する溝幅の比が 3 以上。

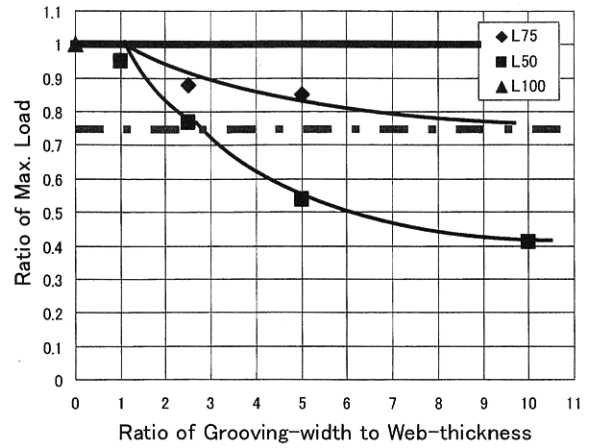


Fig. 6 Effect of grooving width on max. load (T-Shape Specimen)

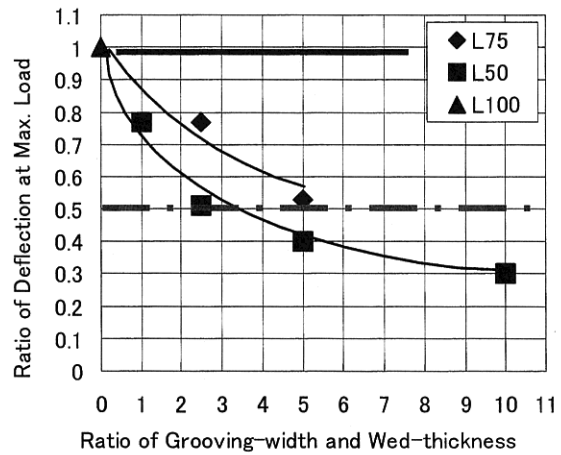


Fig. 7 Effect of grooving width on deflection at max. load (T-Shape Specimen)

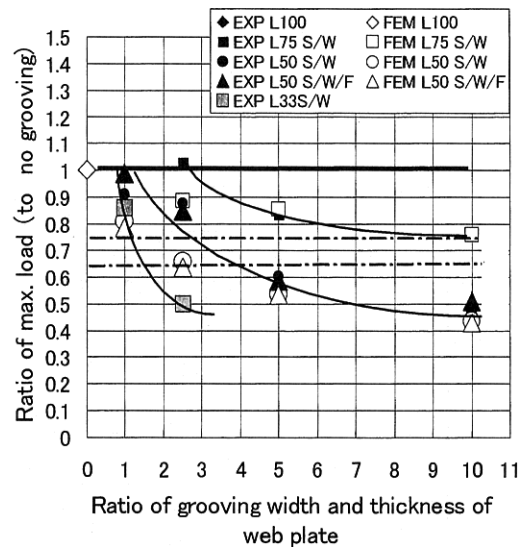


Fig. 8 Effect of grooving width on max. load (Small Model Specimen)²⁾

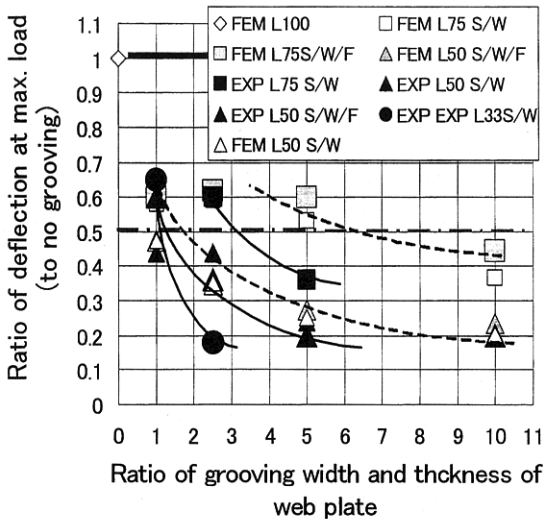


Fig. 9 Effect of grooving width on deflection at max. load (Small Model Specimen)²

Table 3 Effect of inclined angle (20°)

Upper side: Ratio of Max. Load
Lower side: Ratio of Deflection at Max. Load

W/T ₀	0	1	2.5	5	10
D : (mm)	0.81				
0 (L4)	0.71				
0.75 (L3)			0.9		
			0.69		
1.5 (L2)		0.85		0.78	0.78
		0.71		0.58	1.03

2) 傾斜角度の影響

傾斜角度(20°)の影響を Table 3 に示す。隅肉溶接のウェブが 20° 傾斜した場合の最大荷重は、溝幅 W や溝深さ(ΔT)にあまり影響を受けず、直角隅肉溶接の場合の 0.78 から 0.9 である。最大荷重時変位は 0.58 から 1.03 の範囲にあり、最大荷重の場合よりも若干ばらつきが大きい。

3) フェイス形状の影響

Table 4 に示すように、W/T₀=1 の最大荷重比が、フェイスが無い場合 : 0.95、片側(L型) : 0.94、両側(T型) : 0.87 とほぼ 0.9 前後であることから、フェイス形状による最大荷重の違いはあまり大きくないようである。

4) 試験片変形状況

Photo 2 と Photo3 で示したように、ウェブの中央部の外板側でウェブが横方向に面外変形しているが、隅肉溶接部の変形は少ない。また、溝幅が大きい場合 (W/T₀=5,10)にはウェブの溝端部が面外変形の屈曲点になることが分かる。

4. FEM 解析

前報²⁾の小型構造モデル試験体ウェブの応力分布と今

Table 4 Effect of Face Shape

Upper side: Ratio of Max. Load
Lower side: Ratio of Deflection at Max. Load

W / T ₀		0	1	2.5
Face	Right angle		1	0.95
	Inclined 20°		1	0.77
No Face	Right angle		0.94	0.77
	Inclined 20°		0.81	0.51
One side (L)	Right angle		0.94	0.7
	Inclined 20°		0.8	0.7
Both side (T)	Right angle		0.87	
	Inclined 20°		0.88	

Table 5 Mechanical Properties of Testes Steel

Thickness (mm)	Young's Modulus E (GPa)	Yield Point (MPa)	Work Hardening Modulus
6	205.8	404	E/85
19	205.8	346	E/70

回の T 字型試験体ウェブの応力分布を求め実験結果を比較検討するために、FEM 解析を行った。また、前報²⁾で検討した中型試験体について、今回さらに溝部分の板厚が減少した場合の最終強度に及ぼす溝形状の影響を明らかにするために、FEM 解析を追加実施した。

4. 1 小型試験体

Fig. 10 に T 字型試験体の解析モデルを示す。代表的な試験体の弾塑性大たわみ解析を行い、応力分布を求めた。初期設計時を考え、溝を設けていない小型構造試験体の応力分布を求めた。前報²⁾と同様、解析コードは MSC. Marc、要素は四節点厚肉シェル要素 (Element Type 75) である。解析に用いた材料定数を Table 5 に示す。初期不整、溶接残留応力は考慮していない。Fig. 11 に、垂直応力分布 (X 方向及び Y 方向) を示す。これらから、前報²⁾の小型構造モデル (Fig. 12 参照) の場合の垂直応力分布 (X 方向及び Y 方向) (Fig. 13 参照) と同様に、2 点の荷重点間に大きな圧縮応力が発生していることが分かる。尚、今回の試験体での X 方向応力分布の圧縮応力側の領域は、小型構造試験体の場合よりもウェブ板の長手方向に大きく広がっている。また、荷重点の反対側にあたるウェブ板のフェイス側では、引張の X 方向垂直応力が発生していることから最大荷重に対するフェイス形状による影響は少なかったものと考えられる。

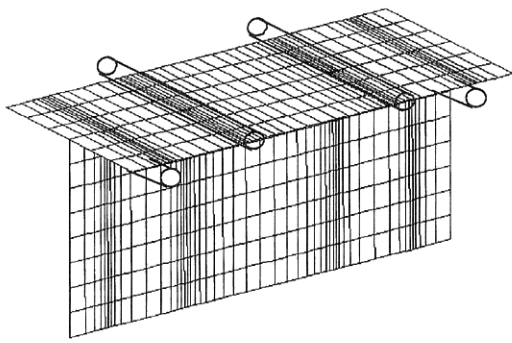


Fig.10 FEM Model of T-Shape Specimen

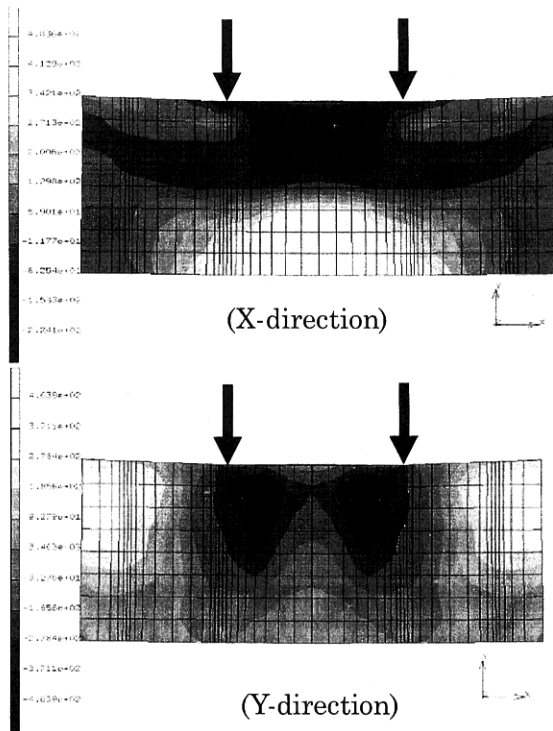


Fig.11 Perpendicular stress distribution (T-Shape Specimen, Web plate)

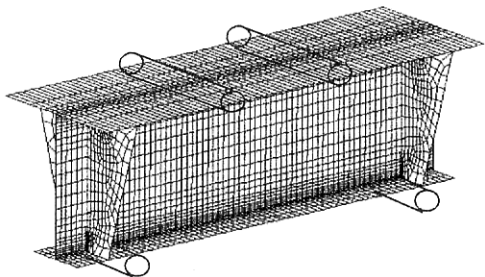


Fig.12 FEM Model of Small Model Specimen²⁾

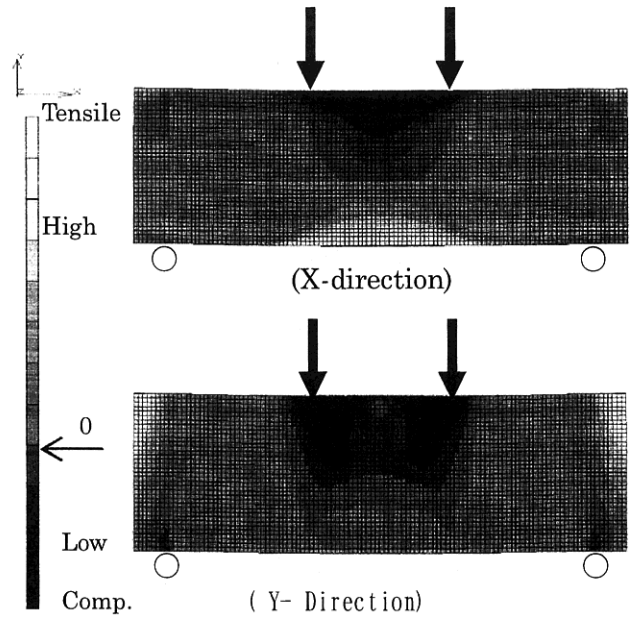


Fig.13 Perpendicular stress distribution at max. load (Small Model Specimen, Web plate)²⁾

4. 2 中型試験体

断面形状を小型構造試験体と同じにして(Fig.1 参照)、試験体を長くした中型構造試験体の場合 (2 点の荷重点間を 1000mm、2 点の支点間を 3000mm)、

① 大きな曲げ圧縮応力領域は荷重点近傍にしか発生しない。

② 全体が一様に曲げ変形していき面外横変形は見られない。

③ 溝部分が塑性変形できるため、ウェブ板は一様に塑性変形していくことから、溝の影響は少ない。

等が分かっている²⁾が、今回、さらに、溝部分の板厚が減少した場合について FEM 解析を行い調査した。解析モデル、解析条件は前報²⁾と同じとした。その結果を、実験結果²⁾と共に、Table 6 に示す。ここで、比較には、一例として、荷重点変位 (H_L) が 60mm での荷重 $P(H_L 60)$ を用いた。Table 6 から、“ウェブ鋼板板厚が元板厚の 33% で溝幅が元板厚の 5 倍程度まで”は、ほとんど最大荷重に及ぼす溝形状の影響が見られないことが分かる。

Table 6 Test and FEM results of Long Model Specimens

T.P. No.	Dimension							Test & FEM Results				
	Shell		Groove					Test		FEM		
	ST	T_0	W	D	T	W/ T_0	T/ T_0	$P(H_L 60) : A$	$P(H_L 60) : B$	A/B		
	(mm)							(kN)	(kN)			
B3-0M	19	6	0	0	6	-	0	330	1.00	324	1.00	1.02
B3-11M	19	6	15	1.25	4.5	2.5	0.75	320	0.97	324	1.00	0.99
B3-13M	19	6	15	1.5	3	2.5	0.5	-	-	322	0.99	-
B3-21M	19	6	15	2	2	2.5	0.33	-	-	317	0.98	-
B3-12M	19	6	30	1.25	4.5	5	0.75	320	0.97	323	1.00	0.99
B3-8M	19	6	30	1.5	3	5	0.5	-	-	321	0.99	-
B3-M1	19	6	30	2	2	5	0.33	-	-	313	0.97	-

$P(H_L 60) : \text{Load at } H_L = 60\text{mm}$

4. 結 言

Table 7 Summary of effect of grooving on static strength fillet welded joint ²⁾

Stress condition	Grooving at fillet welded joint		to ensure 75% of as-built strength
	Effect of shape of grooving	Width	
Tensile	Yes	No	Web thickness should be larger than 75% of as-built thickness.
Parallel shear (Weld bead)	dependency on \square $\square < 1$: Web failure		
Normal shear	$\square > 1$: Bead failure		
Bending	$\square < 1.4$: Web failure $\square > 1.4$: Bead failure		
Compressive by four points bending test	Yes (Lateral deflection)	Yes	$\square = 1$ $W/T_0 < 10$ for L75 (T75) $W/T_0 < 3$ for L50 (T50) $W/T_0 < 1.5$ for L33 (T33)

$\square = [\text{Thickness of web plate (T)}] / [\text{Total thickness of throat (2n)}]$
 $T_0 = \text{Thickness of web plate with no grooving}$
 $T = \text{Thickness of web plate at grooving}$
 $W = \text{Grooving width, } L = \text{Length of leg of weld bead,}$
 $n = \text{Thickness of throat}$

5. 考 察

前報²⁾ (Table 7 参照) で示したように、船体隅肉溶接部に溝状腐食が存在する場合、応力状態(単純引張、単純せん断、単純曲げ、曲げ圧縮)により、溝深さや溝幅の影響が明らかに異なり、単純引張、単純せん断、単純曲げ応力状態が考えられる場合には、溝状腐食による溝深さ即ち溝食部のウェブ板厚や溶接金属のど厚の減少に十分注意する必要があること、また、曲げ圧縮応力状態が考えられる場合には、溝状腐食の深さとともに溝幅にも十分注意する必要があることが分かる。

今回の研究結果から、曲げ圧縮応力状態にある防撓材のウェブに横倒れ防止の無い自立型でも、局所的に大きな圧縮応力分布が有る場合には同様の結果になることが予測される。

また、中型構造試験体での解析結果のように、曲げが支配的で、局所的な面外変形を引き起こす曲げ圧縮応力領域が限定的で小さい場合には、最大強度に及ぼす溝状腐食の影響は少ないものと考えられる。このことから、“面外曲げ変形を引き起こす曲げ圧縮応力領域が小さい場合には、構造物の最終強度に及ぼす溝状腐食の影響は少ない”ものと考えられる。

今後は、船体縦曲げ荷重下における縦通梁のように、完全圧縮応力領域になった場合等について調査する。このように、船体各部の応力状態や腐食状態に対応した隅肉溶接部の腐食予備厚や補修基準・切り替え基準を考える必要がある。尚、溶接残留応力については、今後検討する必要があるものと考えられる。

曲げ圧縮応力状態にある自立型(ウェブに横倒れ防止の無い場合)防撓材の最終強度に及ぼす溝状腐食の影響について、調査した。主な結果は以下の通りである。

1) 自立型防撓材の場合もウェブに横倒れ拘束がある場合と同様の影響を示した。即ち、

①最終形態は、ウェブの大変形(面外横変形)である。

②溝形状(溝深さ、溝幅)は明らかに最終強度に影響を及ぼす。例えば、建造時強度の75%以上とした場合、“溝部板厚が建造時の75%で $W/T_0 < 10$ 、50%で $W/T_0 < 3$ ”と予測される。ここに、 W は溝幅、 T_0 はウェブの元板厚。

2) ウェブ板の傾斜角度は明らかに最終強度に影響を及ぼす。例えば、傾斜角度 20° の場合、最終強度の減少は最大約2割である。

3) フェイス形状(T型、L型)の影響は少ない。

4) 最大荷重後、ウェブは中央部・外板側で横方向に面外変形しているが、外板とウェブとの隅肉溶接部での変形は少ない。

尚、実構造での溝食を検討する場合には、隅肉溶接部の連続性や実際の応力状態、さらに溝食の腐食衰耗量の不均一性を考慮する必要があるものと考えられるが、これらは今後の課題としたい。

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, 造学論, 195号, p.291-297
- 2) 松下, 中井, 山本: 船体隅肉溶接部の曲げ圧縮強度に及ぼす溝状腐食の影響, 造学論, 196号, p.199-206
- 3) 松下, 中井, 山本: 同上, 平成15年度 ClassNK 研究発表会講演集, pp49-58
- 4) 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-, 造学論, 第192号, 2002, pp357-365
- 5) 中井, 松下, 山本, 荒井: π 肋キャリヤ倉内肋骨の腐食実態と強度, NK 誌, 第262号, 平成15(I), 2003, p.27-34 他