

溶接止端位置での主板断面応力分布簡易推定法

後藤, 浩二
九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

小沼, 恵太郎
九州大学大学院工学府建設システム工学専攻

豊貞, 雅宏
九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

<https://hdl.handle.net/2324/4794748>

出版情報 : Journal of the Society of Naval Architects of Japan. 2004 (195), pp.283-289, 2004.
The Japan Society of Naval Architects of Japan
バージョン :
権利関係 :



溶接止端位置での主板断面応力分布簡易推定法

正員 後 藤 浩 二* 正員 小 沼 恵太郎**
正員 豊 貞 雅 宏*

A Simple Estimation Method of the Normal Stress over the Cross-Section of a Plate at Weld Toe

by Koji Gotoh, *Member* Keitaro Konuma, *Member*
Masahiro Toyosada, *Member*

Summary

Many fatigue damages in large welded built-up structures are found near a boxing fillet weld toe. These fatigue cracks usually initiate from the toe and propagate in the cross-section of wall thickness as surface cracks.

Many attempts based on fracture mechanics for the improvement of fatigue life estimation are proposed, because current practical methods based on the $S - N$ curves and the cumulative damage rules cannot estimate the accurate fatigue life under in-service structures. Whereas stress distributions along the fatigue crack path must be given in order to apply fracture mechanics methods for the precise fatigue life estimation, no stress distribution along the path is calculated because the shell type elements are used in finite element analyses in practical structural design stages.

A simple estimation method of the stress distribution over the cross-section of a plate at weld toe, which corresponds to the supposed fatigue crack path in the case mentioned above, is proposed in this paper. The validity of this method is confirmed by comparing estimation results with ones by finite element analyses in which solid type elements are used.

1. 緒 言

船舶や橋梁等の大型溶接鋼構造物の疲労設計は、 $S - N$ 曲線と累積損傷被害則を用いて行うのが一般的であるが、この手法は任意の変動荷重が作用する実構造物に対して十分に機能しないため、現在でも多くの疲労損傷事故が報告されている。また、Paris 則や Elber 則を疲労設計に適用しても、実働荷重下における構造物の疲労

寿命を定量的に推定することは困難である。この理由として、Paris 則や Elber 則のパラメータである ΔK や ΔK_{eff} は、疲労き裂成長の駆動力源であるき裂先端近傍で消費される繰り返し塑性挙動を定量的に反映していないことが挙げられる。また、従来の破壊力学的手法による疲労寿命予測では、疲労き裂成長挙動に大きな影響を及ぼすき裂開口挙動を定量的に考慮していないことも、精度の劣った寿命予測結果を与える原因と考えられる。

著者らは、疲労き裂先端近傍における繰り返し塑性挙動に関する考察から、RPG 荷重 (再引張塑性域形成荷重) 以上の荷重範囲が疲労き裂成長に寄与していることを見だし、このことを考慮した有効応力拡大係数範囲

* 九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

** 九州大学大学院工学府建設システム工学専攻
博士後期課程

ΔK_{RPG} を定義した¹⁾。さらに、き裂開閉口挙動を定量的に取り扱える疲労き裂成長シミュレーションコード FLARP を開発し、種々の荷重条件下において ΔK_{RPG} をパラメータとする疲労き裂成長予測を行い、一連の手法の妥当性を検証した^{2) 3) 4)}。

一方、大型溶接構造物で発生・成長する疲労き裂は、スティフナやブラケットを溶接で取り付けた際の角回し溶接部から発生し、板厚方向に成長して板厚貫通に至るという形態をとることが少なくない。この形式の構造要素は船殻構造には多数存在し、疲労き裂の起点となり得るため、このような構造要素の疲労挙動を定量的に検証することは、船殻構造の疲労損傷を未然に防止するためには極めて重要である。

著者らは、角回し溶接止端から発生し、主板板厚内に成長して板厚貫通に至る疲労き裂の成長予測を、上述の FLARP を用いて実施し、定量的な寿命予測が可能であることを示している⁵⁾。しかしながら、同手法のみならず、Paris 則等の破壊力学的手法を用いて板厚方向に成長する疲労き裂の寿命を予測をする場合でも、板厚内部の板断面垂直方向応力分布を入力データとして与える必要がある。評価対象が三次元構造の場合に板厚内の応力分布を求めるには、ソリッド要素を用いて板厚方向にも要素分割を行った FEM 解析が必要であるが、ソリッド要素を用いて大型構造物をモデル化する作業には莫大な労力が必要である。

一般的な構造設計段階で実施される FEM 解析では、シェル要素を用いてモデル化が行われている。したがって、シェル要素による FEM 解析結果と溶接止端部近傍の応力分布の一般的傾向とをうまく考慮して板厚内応力分布が推定できれば、設計段階において疲労き裂成長を定量的に評価する事が可能となるため、構造物の疲労設計に対して有用である。

そこで本研究では、三次元構造をシェル要素でモデル化した FEM 解析結果から、溶接止端直下の板断面応力分布を推定する手法について検討した。

2. 応力分布簡易推定手法

2.1 応力分布推定の考え方

板表面を原点として板厚方向に z 軸を設定し、評価対象断面の応力分布を $\sigma(z)$ 、この位置に作用している軸力を P 、モーメントを M とすると、 $\sigma(z)$ は、

$$\int_0^t \sigma(z) dz = P \quad (1)$$

$$\int_0^t z \sigma(z) dz = M \quad (2)$$

を満たす必要がある。

シェル要素を用いた FEM 解析結果として節点力 (P) 及び節点モーメント (M) が得られるので、 $\sigma(z)$ の形を適切に仮定し、FEM 解析結果と共に (1) 式、(2) 式に代入すれば、応力分布表示式の未知変数に関する連立方程式が得られる。これを解くことで、 $\sigma(z)$ の関数形を決定できる。

なお、 $\sigma(z)$ の関数形は、溶接止端における応力勾配を定量的に表現できるように設定する必要がある。また、応力分布を推定したい断面位置に FEM モデルの節点を置くことも必要である。

2.2 板厚内応力分布の関数形

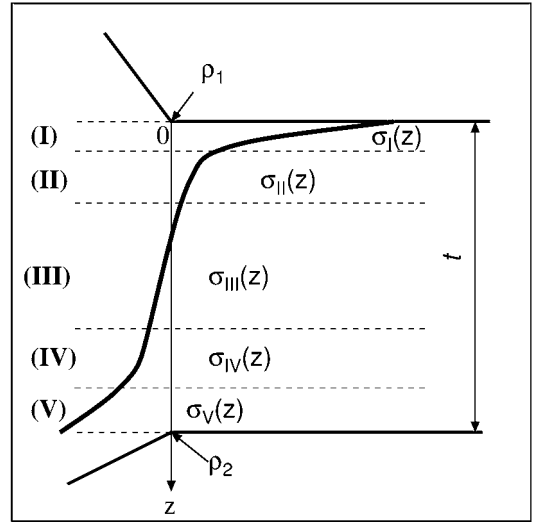


Fig. 1 Schematic illustration of the stress distribution in the plate thickness

本研究で評価対象とする継手形態である、スティフナやブラケット等の付加物を角回し溶接により主板に取り付けた構造の付加物を含む断面に着目すれば、十字継手または T 継手に分類できる。そこで、板厚内応力分布の関数形の設定に際しては、二次元問題である十字継手または T 継手について考え、後に、三次元構造に対しての適用性を検討する。

主板内部の応力分布を検討するために、溶接止端形状による応力集中の影響の程度を考慮して、板厚内を Fig.1に示す 5 つの領域に区分して取り扱う。

なお、T 継手のように主板裏面に応力集中限となる溶接部 (Fig.1における曲率半径 ρ_2 である溶接部) が存在しない場合は、領域 IV 及び領域 V の部分は無く、領域 III が主板裏面まで続いているとして取り扱う。

2.2.1 領域 I 及び領域 V

これらの領域における応力分布は、溶接止端形状の影響を大きく受ける。溶接止端形状が応力分布に及ぼす影響を評価するために、止端形状をある曲率を有する円弧状に近似し、切欠底近傍の応力分布表示式を用いて溶接止端位置近傍での主板断面応力分布を与えることを考える。

そこで、種々の切欠底近傍における応力分布の表示式^{6) 7)}も参照し、試行錯誤的に最もよい結果を与えた Weiss による表示式⁸⁾を参照して、主材表面の溶接止端部近傍 ($0 \leq z \leq \sqrt{\rho_1/2}$) を領域 I、同裏面の溶接止端部近傍 ($t - \sqrt{\rho_2/2} \leq z \leq t$) を領域 V と設定した。

このとき、応力分布は次式で表現できる。

$$\sigma_I = K_{t1} \sqrt{\rho_1 / (\rho_1 + 4z)} \sigma_0(z) \quad (3)$$

$$\sigma_V = K_{t2} \sqrt{\rho_2 / (\rho_2 + 4(z - t/2))} \sigma_0(z) \quad (4)$$

ただし、

- t : 主板の板厚
- ρ_1, ρ_2 : 溶接止端半径 (Fig.1 参照)
- K_{t1}, K_{t2} : 応力集中係数
- $\sigma_0(z)$: 公称応力分布
- z : 板厚方向座標

2.2.2 領域 III

この領域内の応力分布は、溶接止端部形状に関する応力集中の影響を受けず、ほぼ直線分布を示す。

$$\sigma_{III}(z) = a_1 z + a_2 \quad (5)$$

ただし、 a_1, a_2 は定数である。

この領域の範囲を検討するため、過去に報告されている FEM 解析による板厚内応力分布の計算事例を調査した。調査対象の構造要素は、角回し溶接継手⁹⁾、船殻構造に多数存在する直交交差部のモデル試験体及び T 継手形式の試験体¹⁰⁾、パイプサポートなどの基部としての PAD プレートを取り付けた構造¹¹⁾、目違い ($0.3t, 0.5t, 1.0t$, t は板厚) を有する十字継手¹²⁾、鋼管 T 継手 (溶接止端半径 0.1mm 及び 0.6mm)¹³⁾ と多種に渡っている。これらの FEM モデルにおいて溶接止端形状を考慮しているものは鋼管 T 継手だけであり、他のモデルでは溶接止端形状は考慮されていない。しかしながら、ここで検討しようとしていることは溶接止端形状の応力分布に及ぼす影響ではないので、止端形状を無視したモデル化による FEM 解析結果を利用しても、問題無いと考えられる。調査事例の概要をそれぞれ Table 1 に示す。

調査結果を Fig.2 に示す。横軸は溶接止端位置を原点

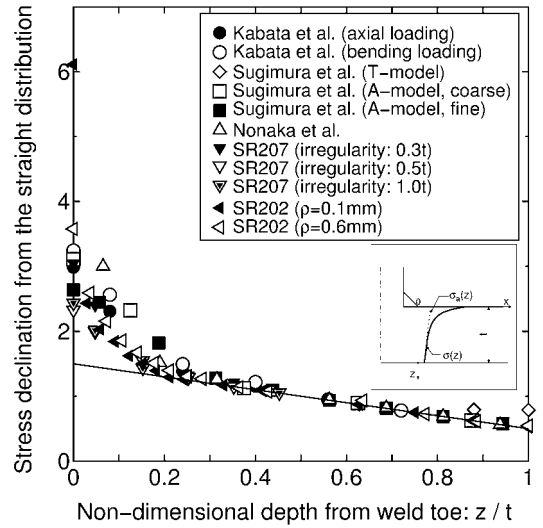


Fig. 2 Stress declination from the straight distribution

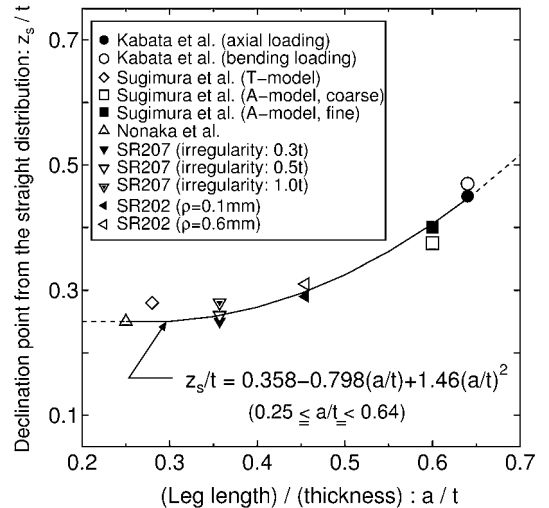


Fig. 3 Declination point from the straight distribution

としたときの板厚方向深さ z を板厚 t で無次元化した値である。縦軸は、Fig.2内に示すように、板厚内応力分布を主板背面側を基準にして直線近似したときのずれを表しており、図中に示した直線 ($z/t = 0$ の時 1.5, $z/t = 1$ の時 0.5 を通過する直線) にデータが重なっている区間は、Fig.1の領域 III の近似が可能な領域と考えられる。同図中のデータプロットは、上記直線近似結果が図中の直線に一致するように正規化された結果であるので、同図はあくまでも直線近似からの“ずれ”の指標にすぎないことに留意する必要がある。なお、同図にお

Table 1 Summary of the referenced finite element models

Authors	Type of structure	Type of loading	Number of elements in the plate	Thickness [mm]	Leg length [mm]
Kabata et al. ⁹⁾	Boxing fillet welded joint	Axial	6	12.5	8.0
		Bending	6		
Sugimura et al. ¹⁰⁾	Cruciform joint structure	Mixed	8	20.0	12
	T joint	3P bending	4	25.0	7.0
Nonaka et al. ¹¹⁾	Lap joint	Axial	8	20.0	5.0
SR207 ¹²⁾	Cruciform joint with irregularity 0.3 <i>t</i> , 0.5 <i>t</i> and 1.0 <i>t</i>	Axial	10	21.0	7.5
SR202 ¹³⁾	Tubular T joint (radii of weld toe: 0.1, 0.6mm)	Axial (brace direction)	15	22.0	10.0

Table 2 Calculation conditions

Case	cruciform join				T join		
	ρ_1 [mm]	ρ_2 [mm]	P [kN]	M [kN mm]	ρ [mm]	P [kN]	M [kN mm]
N-1	0.7	0.7	10.0	0.0	0.7	10.0	0.0
N-2	0.7	1.0	10.0	0.0	—	—	—
M-1	0.7	0.7	0.0	13.3	0.7	0.0	13.3
M-2	0.7	1.0	0.0	13.3	—	—	—
NM-1	0.7	0.7	10.0	13.3	0.7	10.0	13.3
NM-2	0.7	1.0	10.0	13.3	—	—	—

いて、十字継手の結果は $z/t = 0.5$ の範囲までを調査対象とした。

また、溶接止端形状を無視した巨視的なビード形状も主板内の応力分布に影響を与えると考えられることから、この巨視的なビード形状を表す指標として脚長 a に着目し、Fig.2中の直線部からデータがそれ始める位置 z_s について検討した。この結果を、Fig.3に示す。また、最小二乗近似によりこの位置を (7) 式で与えた。ただし、位置 z_s の検討に際しては、 $0.25 \leq a/t \leq 0.64$ の範囲のデータしか検討していないこともあり、(7) 式には、 $0.25 \leq a/t \leq 0.64$ という制限を設けた。

$$(z_s/t) = 0.358 - 0.798(a/t) + 1.46(a/t)^2, \quad (6) \\ (0.25 \leq a/t \leq 0.64)$$

以上の結果、Fig.1の領域 III の範囲として、 $z_s \leq z \leq 1 - z_s$ を採用することにした。

領域 III の範囲は板厚と脚長の比に応じて変化していたことから、今回の結論は、調査対象の脚長と主板厚の比 (a/t) が $0.25 \leq a/t \leq 0.64$ を満たす場合に限定して適用すべきである。実際の船殻構造に存在する溶接継手は、ほぼ $0.25 \leq a/t \leq 0.64$ を満足しているので、実構造へ適用するに当たっては、特に問題はないと考えら

れる。

2.2.3 領域 II 及び領域 IV

領域 I と領域 III の間を領域 II、領域 III と領域 V の間を領域 IV とする。これらの領域における応力分布は、上述の式と滑らかに連続する必要性を考慮して、次式で表現する。

$$\sigma_{II} = a_3 \sqrt{\rho_1/(\rho_1 + 4z)} + a_4 z + a_5 \quad (7)$$

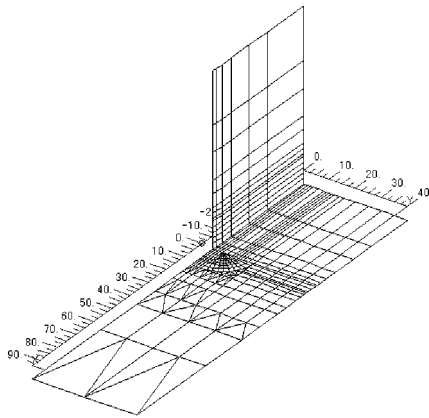
$$\sigma_{IV} = a_6 \sqrt{\rho_2/(\rho_2 + 4(z - t/2))} + a_7 z + a_8 \quad (8)$$

ただし、 $a_3 \sim a_8$ は定数である。

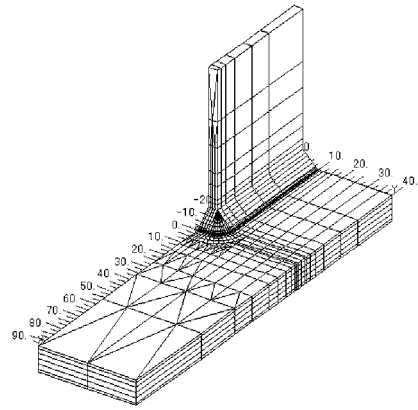
未知係数 K_{t1} , K_{t2} , $a_1 \sim a_8$ は、以下の連立方程式を解くことで決定出来る。

- (3)~(8) 式を、(1) 式に代入することで得られる、軸力の釣り合い式。
- (3)~(8) 式を、(2) 式に代入することで得られる、モーメントの釣り合い式。
- それぞれの領域の端部における応力の値及び応力勾配の連続条件。

3. 応力分布の推定例



(a) Idealization by shell elements



(b) Idealization by solid elements

Fig. 4 Finite element idealizations

3.1 十字継手と T 継手の応力集中係数の推定

Table 3 Estimated stress concentration factors

Case	cruciform joint		T joint
	K_{t1}	K_{t2}	K_t
N-1	2.66 (2.63*)	2.66 (2.63*)	2.44 (2.22*)
N-2	2.65	2.36	—
M-1	2.23	2.23	2.45 (2.45*)
M-2	2.23	1.98	—
NM-1	2.47	3.51	2.44
NM-2	2.47	3.08	—

* After Tsuji ¹⁴⁾

前節に述べた簡易推定法を用いて、十字継手と T 継手の主板内応力分布を推定し、その結果として得られた応力集中係数の妥当性を検討した。外力の载荷条件による影響を考慮するために、(i) 軸力のみ载荷した場合、(ii) 曲げモーメントのみ载荷した場合、(iii) 軸力と曲げモーメントを同時载荷した場合、の 3 ケースを設定した。さらに十字継手に対してのみ、上下フランジ付根の溶接止端部における切欠き半径が異なる場合も設定した。解析ケースを Table 2 に示す。なお、前節で導出した式の適用範囲を考慮し、主板の板厚は 10mm、脚長は 6mm に設定した。

推定結果の妥当性を検討するため、上述の手法に従って得られた溶接止端の応力集中係数 K_{t1} 、 K_{t2} と、辻による十字継手、T 継手の溶接止端の応力集中係数推定式 ¹⁴⁾ による結果の比較を行った。結果を Table 3 に示す。

Table 3 中に示した数値は、本手法による結果であり、

同表中に括弧付きで示した数値が辻の推定式による結果である。なお、辻の推定式は、(i) 引張を受ける十字継手 (止端半径が上下の溶接とも同じ場合)、(ii) 引張を受ける T 字継手、(iii) 曲げを受ける T 字継手、の三種類に対する推定式であるため、これと異なる継手に対しては推定を行っていない。

Table 3 に示した、本手法と辻の推定式の結果の比較から、本推定法により得られた応力集中係数の値は妥当であると判断出来る。

3.2 角回し溶接継手の主板内応力分布の推定

次に、角回し溶接継手の主板内応力分布の推定を試み、三次元ソリッド要素を用いた FEM 解析結果と比較することで、本手法の妥当性を検討した。FEM 解析は構造の対称性を考慮してその 1/4 をモデル化した。

Fig.4 は解析対象の FEM モデル図 (板厚 10mm) であり、(a) のシェル要素による解析結果として得られる評価対象位置の節点力、節点モーメントを (1)、(2) 式の P 、 M として与える。(b) のソリッド要素による解析結果と比較することで、本手法の妥当性を検証する。

シェル要素は四節点アイソパラメトリック要素と、角回し溶接止端近傍のモデル化では一部だけ三角形ひずみ一定要素を用いた。一辺の最小要素寸法は 1mm である。ソリッド要素は八節点アイソパラメトリック要素と、角回し溶接止端近傍のモデル化では一部だけ五面体ひずみ一定要素を用いた。一辺の最小要素寸法は 0.1mm である。また、ソリッド要素によるモデル化の際には、溶接止端半径 (0.7mm) と脚長 (6mm) を考慮してモデルを作成した。载荷条件は、(i) 軸力のみ、(ii) 曲げモーメントのみ、(iii) 軸力と曲げモーメントの両方、の三種類で

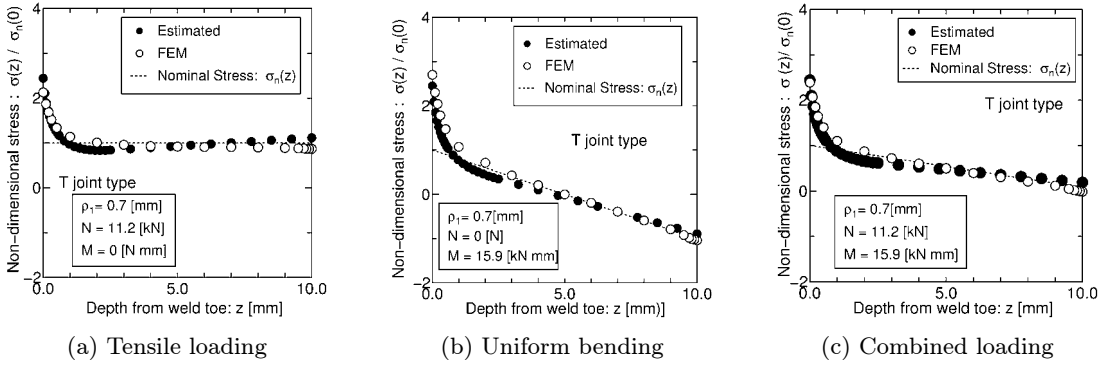


Fig. 5 Comparison of stress distributions between by proposed method and by finite element analyses (T joint type)

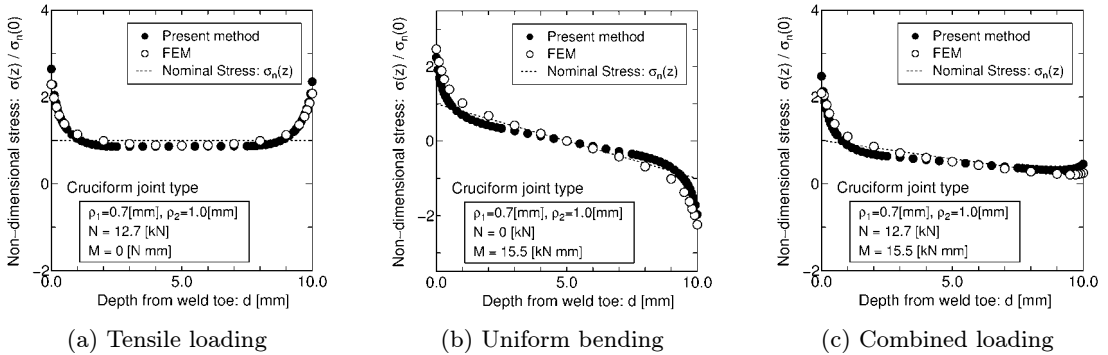


Fig. 6 Comparison of stress distributions between by proposed method and by finite element analyses (Cruciform joint type)

ある。

Fig.5に本手法による推定結果とソリッド要素を用いた FEM 解析結果の比較を示す。いずれの場合も、溶接止端近傍で若干の差はあるものの、板厚内部全体の応力分布の傾向はよく一致している。本推定手法では、評価対象位置の軸力と曲げモーメントの値を入力データとして与える必要があるが、評価対象位置に軸力または曲げモーメントのいずれかが生じない場合であっても、推定結果は良く一致している。

さらに、本手法の妥当性を検討するために、十字継手タイプについても検討した。この時、より一般的な継手に対して本手法の妥当性を検証するため、主板上下面の溶接止端半径を変化させてモデルを作成した。板厚と脚長については Fig.4と同じ値としている。最小メッシュ寸法や用いた要素の種類は Fig.4と同様である。

Fig.6に本手法による推定結果とソリッド要素を用いた FEM 解析結果の比較を示す。T 継手タイプの場合と同様に、溶接止端近傍で若干の差はあるものの、板厚内部全体の応力分布の傾向はよく一致している。

以上の結果、モデル化の簡便さや構造設計段階で得ら

れた情報をそのまま用いる事が出来る利便性を勘案すれば、本手法は簡便かつ有用な、板厚内の応力分布推定手法であると言える。

4. 結論

船殻構造における疲労損傷には、構造中に多数存在するスティフナやブラケットの角回し溶接部から疲労き裂が発生し、板厚方向に成長して板厚貫通に至る形態をとることが少なくない。このような構造要素に対して疲労挙動を定量的に検証しておくことは、船殻構造の疲労損傷を未然に防止するために重要であり、より定量的な寿命評価のためには、 $S - N$ 曲線に替わり、破壊力学的手法を採用する必要がある。この場合、疲労き裂の起点となる溶接止端の直下にある主板断面に垂直方向の応力分布を入力データとして与える必要があるが、三次元構造の場合に板厚内の応力分布を求めるためには、ソリッド要素を用いて板厚方向にも要素分割を行った FEM 解析を行う必要がある。しかし、一般的な構造設計段階で実施される FEM 解析では、シェル要素によるモデル化に留まっているので、この結果から主板断面に作用する応

力分布を推定する手法があれば、設計段階における疲労強度評価の精度向上に対して有用である。

そこで本研究では、シェル要素による FEM 解析結果と溶接止端部近傍の応力分布の一般的な傾向を考慮して、板厚内応力分布を推定する手法を提案し、同手法の妥当性を確認した。なお、応力分布の関数形の仮定にあたって調査した脚長と主板厚の比 (a/t) が $0.25 \leq a/t \leq 0.64$ であった。実際の船殻構造に存在する溶接継手は、ほぼこの条件を満足するので、本手法は簡便かつ有用な、板厚内の応力分布推定手法である。

参 考 文 献

- 1) Toyosada M. and Niwa T.: The Significance of RPG Load for Fatigue Crack Propagation and the development of a compliance measuring system, International Journal of Fracture, Vol.67, 1994, pp.217-230.
- 2) 豊貞雅宏, 丹羽敏男: 鋼構造物の疲労寿命予測, 共立出版株式会社, 2001
- 3) Toyosada, M., Gotoh, K. and Niwa, T. : Fatigue Crack Propagation for a Through Thickness Crack: A crack propagation law considering cyclic plasticity near the crack tip, International Journal of Fatigue, 2004, (印刷中)
- 4) Toyosada, M., Gotoh, K. and Niwa, T. : Fatigue Life Assessment for Welded Structures without Initial Defects: An Algorithm for Predicting Fatigue Crack Growth from a Sound Site, International Journal of Fatigue, 2004, (印刷中)
- 5) 豊貞雅宏, 丹羽敏男, 松田宏之: 応力集中部から発生・伝播する表面き裂の成長過程とその寿命予測について, 日本造船学会論文集, Vol.190, 2001, pp.517-530
- 6) Glinka, G. : Calculation of Inelastic Notch-Tip Strain-Stress Histories under Cyclic Loading, Engineering Fracture Mechanics, Vol.22, No.5, 1985, pp.839-854
- 7) 岡村弘之: 線形破壊力学入門, 培風館, 1976, pp.16
- 8) 横堀武夫: 材料強度学 (第二版), 岩波全書, 1974, pp.96
- 9) 梶田剛, 井上克明, 矢島浩, 豊貞雅宏: 照査応力による疲労強度評価に関する一考察, 西部造船会々報, No.85, 1992, pp.141-148
- 10) 杉村忠士, 井上総一郎, 白木原浩: 直交交差部における疲労強度精査に関する一考察, 関西造船協会論文集, No.238, 2002, pp.155-162
- 11) 野中眞治, 川内弘, 白木政寛, 香川洸二: パッドプレート溶接部近傍応力精査手法に関する基礎的研究, 西部造船会々報, No.94, 1997, pp.157-169
- 12) (社) 日本造船研究協会第 207 研究部会: 船殻構造の強度評価と管理目標の定量化の調査研究 (総合報告書), 1993
- 13) (社) 日本造船研究協会第 202 研究部会: 海洋構造物の疲労設計法及び溶接部の品質に関する研究 (総合報告書), 1991
- 14) 辻勇: 非荷重伝達型すみ肉溶接継手の止端部の応力集中係数の推定式, 西部造船会々報, No.80, 1990, pp.241-251