――ビード止端の応力集中と疲労寿命――

正員	小野塚	正	*	正員	後]]]	理*
正員	熊 倉		靖**	正員	辻		勇***

The Influence of Bead Toe Shapes on the Fatigue Strength of Fillet Welds (1 st Report) --Stress Concentrations of the Bead Toe and Fatigue Life---

> by Masakazu Onozuka, *Member* Osamu Ushirokawa, *Member* Yasushi Kumakura, *Member* Isamu Tsuji, *Member*

Summary

Experimental studies were carried out to examine the influences of flank angle and undercuts at the weld toe on the fatigue strength. Non-load carrying cruciform and tee fillet welded joints were tested and quantitative life reduction due to undercut was obtained. It was also found that the flank angle has a little influence on the fatigue strength.

The lives of specimens to failure were analysed based on the stress concentration factors at the weld toe. Visible crack initiation life was evaluated by calculating the elastic stress cyclings at the weld toe and crack growth was estimated through the Paris' law. The specimen life to failure was estimated s the sum of these two lives. Estimated lives were compared with test results and it was confirmed that this procedure gives the fatigue life of the fillet weld specimen with sufficient accuracy. The influence of undercut depth could quantitatively be discussed based on the estimated life of welded joints as well as test results.

1. 緒 言

繰返し荷重を受ける大形溶接構造物では、構造設計の1 項目として、疲労破壊に対する安全性検討が重要な項目と なっている。特に石油掘削用の海洋構造物については、海 象の厳しい海域に設置されるケースが多いことから、稼働 海域の環境条件を含めた詳細な疲労強度構造設計方法が研 究・開発され、各国の適用規則¹¹あるいは船級協会規則²¹ として整備されつつある。

これら規則では、これまでに得られた溶接継手疲労試験 データの集積を参照して、設計応力の制限値が規定されて いる。しかし、これらデータの多くは試験用に製作された 品質の良い継手から得られていると推測される。

一方,溶接構造物を実際に製作する段階では,設計段階 で設定した継手強度を確保することが必要であり,そのた めの品質管理が重要となってくる。疲労強度との関連で継 手部の品質に言及した論文、解説は数多い。しかし、疲労 強度に対し最も大きな影響を持つと予測され、しかも製造 検査で厳しくチェックされているアンダーカットについて は、大きく強度を低下させる³⁾、いや、あまり影響がない と^{4),5)}極端に見解が分かれていて定説がない。規則⁶⁾で採否 基準が設定されていても、溶接施工上の品質基準なのか強 度確保の観点から必要な管理基準なのか必ずしも明確では なかったというのが実状であろう。現実に溶接継手部の品 質管理基準を疲労強度と関連づけて設定しようとする場合 には、このビード止端部のアンダーカット量と局部のピー ド立上り角の影響を定量評価することが必要になる。以上 の認識に立ち,(社)日本造船研究協会内に「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」部会が設けら れ、「工作法分科会」でアンダーカット量及びビードフラン ク角に着目した実験研究が実施された。本報告では、この 実験結果を紹介すると同時に、ビード止端の応力集中に着 目して亀裂の発生寿命とその後の進展寿命を計算し両者の 和として部材寿命を計算する寿命算定法の適用性について

^{*} 石川島播磨重工業(株)技術研究所

^{**} 石川島播磨重工業(株)船舶海洋事業本部

^{***} 九州大学名誉教授

日本造船学会論文集 第170号

述べる。この寿命計算法は,これまで実験的評価に依存す ることの多かった疲労寿命評価に対して,疲労強度研究の 成果を活用して構造設計的に評価しようという方法で,一 部に大胆な仮定を含んでいる。しかし一部の疲労試験結果に 対して対応の良い寿命計算結果が得られ,また寿命に影響 する各種因子を検討するにも有用な手法であると思われる のでここに紹介する。

2. 実験的検討

2.1 供試継手

海洋構造物で広く使用されている降伏点 353 MPa 級高 張力鋼 NK KE 36(TMCP 鋼),板厚 22 mm を主供試鋼板 として、これに板厚 10 mm または 22 mm のリブ板を被覆 アーク溶接により隅肉溶接し、荷重非伝達型の隅肉十字継 手及び隅肉T継手を製作した。供試鋼板と溶接材料の機械 的性質を Table 1 に示す。

試験継手系列は Table 2 に示す 4 系列である。C1 継手 (Cruciform-1) と T1 (Tee-1) はリブ板板厚 10 mm, 脚 長 8 mm (目標) の十字継手とT継手である。C2 継手は隅 肉ビード止端の応力集中が異なる場合の状況を確認するこ とを狙いとしてリブ板板厚を 22 mm, 脚長を 16 mm, そし

Table 1 Mechanical Properties of Materials tested

thickness (mm)	yield stress (MPa)	tensile strength (MPa)	elongation (%)
10	445	507	25
22	487	564	25
electrode	500	570	32

Table 2 Fillet Shapes and Sizes of Test Joints

load type	joint type	main plate (mm)	rib plate (mma)	leg length (mm)	flank angle (deg.)	
tensile	C1	22	10	8	50	
	C2		22	16		
	C1-90		10	8	90	
bend	T1	1	10	8	50	

Table 3 Examples of Welding Conditions

joint type	leg length (mm)	flank angle (deg.)	welding position	No.of passes	heat input (J/cm)
C1-90	8	90	flat	2	16~~25
T1	8	50	vertical	1	31~32

てさらにビード形状を滑らかに整形した十字継手である。 また,C1-90 継手はビード止端の局部フランク角の影響を 調べるためC1 継手とリブ板板厚,脚長寸法を同一として 局部フランク角を90°とした継手である。これら4系列の 継手それぞれについてほぼ同一の溶接条件のもと運棒角度 を変えるなどの工夫をして,アンダーカット4段階(目標; アンダーカットなし健全継手(シリーズ00),0.3 mm(03), 0.5 mm(05),1.0 mm(10))およびフランク角2段階(C1 系列のみ,目標50°(標準),90°(90))の溶接継手,合計14 系列を製作した。溶接条件の1例をTable3に示す。アン ダーカット付試験片では,ビード止端全長にわたりりアン ダーカットを分布させることができたが、アンダーカット の深さと幅はビード全長のなかで変化していた。

2.2 疲労試験片

これら4系列のアンダーカット付継手から疲労試験片を 切断,加工した。十字隅肉継手からは幅80mmの引張荷重 試験片を,またT隅肉継手からは幅100mmの3点曲げ荷 重試験片を採取した。試験片の形状,寸法をFig.1に示す。

試験に先立ち歯科用印象剤を用いてビード形状を型取り した。溶接ビードと直角な断面でで切断し、ビード止端の フランク角(θ)および止端半径1(ρ)、アンダーカット深さ (d)を計測した。C1継手の断面形状計測例をFig.2に示 す。アンダーカットなしの継手では止端半径が0.5 mm か ら 2.0 mm の範囲でばらつき、アンダーカット付継手では アンダーカット底の曲率半径が0.7 mm から1.5 mm の 範囲でばらついている。局部的なフランク角は60°を中心 に分布していた。このような計測はビードのどの断面をと るかで計測値に差がでて代表寸法を決めるのがむずかしい が、ビード止端の応力集中をモデル化するには重要なデー タである。



(a) Tensile Test Specimen
 (b) 3 Point Bend Specimen
 Fig. 1 Configurations of Fatigue Test Specimens





- (a) Joints without (b) Joints with undercuts
- Fig. 2 Relations of Flank Angle and Toe Radius Measured in Fillet Welded Joints

2.3 疲労試験

室温,大気中で一定荷重振幅(応力比 R=0.1)の疲労試 験を実施した。亀裂が最初に発生したと思われる近傍のア ンダーカット最大深さで試験片の条件を再整理し,結果を 公称負荷応力と試験片の破断寿命の関係で Fig.3 に示す。 公称負荷応力とは、アンダーカットを考えない断面を基準 とした応力で,引張荷重試験の場合には断面の平均応力で、 3点曲げ荷重試験の場合には梁の変形としてビード止端位 置における曲げ応力である。試験片の破断寿命はアンダー カット寸法の影響を強く受け、アンダーカットなしの健全 継手と比較すると1mm内外のアンダーカットを持つ継 手は寿命が凡そ1/3になった。強度で表現すると2/3に 相当する。その一方で、ビード止端の局部フランク角の影 響は明確には現われず、50°標準角度の継手シリーズと90° の極端なフランク角の継手はほぼ類似の破断寿命を示し た。

試験ではビード止端近傍に歪ゲージを貼付して, 歪出力 変化をモニターし小寸法亀裂発見の手掛りとしたが(深さ 1~2 mm の亀裂発見に対応した), アンダーカット深さの 大小はこの小寸法亀裂の発生寿命に大きく影響し, アンダ ーカットが深くなるとこの小寸法亀裂の発生までの寿命が 極端に減少した。前記の寿命差はこの小寸法亀裂の発生寿 命差としても良いようであった。

外観上からは全くアンダーカットがないと見なせる健全 継手でも破面を仔細に観察すると0.1 mm 程度のごく浅 いアンダーカットが部分的に認められることがあった。完 全な溶接のままの継手の基準,外観からのごく浅いアンダ ーカットの特定は実際上難しい点を含んでいることも確認 された。



(a) C1 and C1-90 Joints. (Tensile Test)

(b) C2 Joints (Tensile Test)





696

日本造船学会論文集 第170号

①弓

3. 隅肉継手の疲労寿命算出方法

3.1 疲労寿命評価と寿命算出の手順

溶接構造物の破壊強度評価技術は,構造解析技術の進歩 とそれに伴う正確な部材応力の算出,それに対比する材料 確性データの集積とによって着実に進歩し,確度を高めて いる。管構造を対象とするホット・スポット応力を板骨構 造に拡張定義して,評価応力を機械的に定めてより一般性 のある寿命評価方法を探ろうという試みもなされている。 しかし一般には,溶接継手の形状をいくつかのタイプに区 分して対応する疲労試験結果を参照することにより疲労強 度,疲労寿命の評価をすることが多い。いずれの方法をと るにしても,評価応力に対応する寿命線図が必要となる。

これに対して、溶接のままの継手ではビード止端に必ず 亀裂の起点となる欠陥があり、溶接継手の寿命は専ら亀裂 の進展寿命である、従って亀裂の進展計算の精度を高めれ ば溶接継手の破断寿命を計算できるとの考え方がある。亀 裂の進展挙動の観察、モデル化に対し努力が払われている が、現状では小寸法領域の亀裂の挙動が充分解明されてい るとはいえず,限られたケースの寿命算出は可能なものの、 多くのケースについて寿命計算ができるまでには進んでい ないのが現状である。

著者らはこれまで構造設計的に溶接継手の寿命を計算す る方法として、ピード止端の局部弾性応力の繰返しから目 視亀裂の発生寿命を推定し、これに Paris 則によって計算 される亀裂の進展寿命を組合せ部材の破断寿命とする方法 を提案してきたⁿ。この方法の有効性は、曲げ荷重疲労試験 における部材の板厚効果を説明できることで確認してい る。本方法はビード止端の応力集中をいかにモデル化する かによって結果が左右されるが、構造解析の延長として疲 労試験によらずに部材寿命を算出できる可能性を持ち、将 来的にはさまざまな拡張が可能であると考えている。現状 では多くの仮定を設けた簡略計算法であるので、限られた 精度内で寿命を算出できるのは一部のケースに留まると思 われるが、応力集中係数を算出すれば寿命に関係する各要 因を定量評価できるという特徴があるので、アンダーカッ ト付の溶接継手データの寿命解析に対する適用を試みた。

3.2 溶接ビード止端の応力集中係数

著者のひとり後川⁸⁾ は溶接継手の疲労寿命を算出する鍵 はビード止端の応力集中にあると考え、板厚 40 mm 迄の 突合せ継手,隅肉継手の応力集中係数を有限要素法により 数値解析して,応力集中係数の簡易表示式を提案した。そ の後辻⁹⁾ は継手の疲労寿命に対する板厚効果を説明するた めの基礎データとして,板厚 80 mm までの隅肉継手につ いて線形要素を用いた境界要素法による計算を行ない,次 に示す応力集中係数の簡易表示式を見出した。

応力集中係数 Kt の定義

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n}$$

ここで
$$\sigma_{\max}$$
:溶接ビード止端の最大応力
 σ_n :公称応力
引張負荷:断面の平均応力
曲げ負荷:ビード止端位置の曲げ応力
引張負荷を受ける隅肉十字継手の応力集中係数
 $K_{\epsilon} = 1 + \left\{ 1.348 + 0.397 \cdot \ln\left(\frac{S}{t_1}\right) \right\} Q^{0.467} \cdot f_{\theta}$ (1

)

$$f_{\theta} = \frac{1 - \exp\left\{-0.90\sqrt{\frac{W}{2h}} \cdot \theta\right\}}{1 - \exp\left\{-0.90 \cdot \sqrt{\frac{W}{2h}} \cdot \frac{\pi}{2}\right\}}$$

$$W = t + 2h$$

$$Q = \frac{1}{2.8 \cdot \left(\frac{W}{t_{1}}\right) - 2} \times \left(\frac{h}{\rho}\right)$$

$$S = t_{2} + 2h_{p}$$

$$h_{p} : 主板側隅肉脚長 \qquad h : \mathcal{Y} ブ 板側隅肉脚長$$

$$K_{t} = 1 + \left\{ 0.629 + 0.058 \cdot \ln\left(\frac{S}{t_{1}}\right) \right\} \times \left(\frac{\rho}{t}\right)$$
$$\times \tanh\left(\frac{6h}{t_{1}}\right) f_{\theta}$$
(2)

ここで f_{θ} , S は(1)式の場合と同一である。 Fig.2 のビード止端半径の計測結果を参照し $\rho=1 \text{ mm}$ として(1)式,(2)式による応力集中係数の板厚依存性を示 すと Fig.4 のようになる。



Fig. 4 Thickness Effect on the Stress Concentration Factors at the Weld Bead Toe



Fig. 5 Stress Concentration Factors at Bottoms of weld undercuts

ビード止端にアンダーカットが存在すると、応力の流れ はアンダーカットの影響を受けて、切欠底の応力集中の度 合いが高められる。アンダーカットの断面形状は、隅肉ビ ードが滑らかにアンダーカット底まで連続していて有限先 端半径を持つV字状切欠に近い。そこで、アンダーカット 底の曲率半径を1mmに固定してアンダーカットなしの 場合と連続性を保たせて、V字状切欠としてアンダーカッ トをモデル化し、境界要素法により応力集中係数を計算し た。切欠底は32分割とした。応力集中係数のアンダーカッ ト深さ依存性をFig.5に示す。アンダーカットが0と0.1 mmとで応力集中係数に大な差ができるが0.3mm以上 になるとアンダーカット深さの増加に対応して徐々に応力 集中係数は増加するいう結果であった。応力集中係数を基 礎とする計算では微小なアンダーカットの有無が寿命に微 妙に影響してくることになる。

3.3 疲労亀裂の発生寿命の推定

原子力機器や一部の容器では、局部の応力・歪繰返しを 評価基準として疲労寿命推定がなされる。その評価データ 採取のため、多数の径歪制御両振疲労試験が実施された。 飯田らは¹⁰⁾ 目視により発見できる小亀裂発生寿命に着目 してデータを整理し、降伏点 490 MPa までの低中強度鋼の 負荷歪振幅と目視亀裂発生寿命の関係は平均的に次式によ り表現できるとした。

 $\varepsilon_{ta} = 0.415 \cdot N_c^{-0.606} + 0.00412 \cdot N_c^{-0.115}$ (3) $\zeta \subset \zeta^{\circ}$

- ε_{ta} :負荷歪振幅
- Nc:目視亀裂発生寿命

ビード止端の応力変動を考えるとき、応力集中係数は 2.5~5の範囲であり、試験荷重条件では弾性応力の繰返し は 250 MPa~1 GPa の範囲となる。ビード止端近傍には降 伏点に近い溶接残留応力が存在しているので、ビード止端 の応力変動は Shake-Down 挙動を経て供試材の降伏点を 上限応力とする弾性応力繰返しになっていると考えて良 い。(3)式は完全両振状態での寿命推定式であるので若干 条件が異なり、 $K_t \cdot \Delta \sigma_n = 2 \cdot \sigma_y$ 近傍で条件が一致し、低応力 繰返しでは寿命を過大に算出してしまう。また(3)式はそ もそも 10⁵ 回以下の低サイクル疲労を主対象としているの で長寿命側の寿命算出には必ずしも適しているとはいえな いが、現段階ではこれに代る寿命表示式も見当らない。こ こでは(3)式の歪表示をビードに直角方向の応力表示に書 き換えて目視亀裂発生寿命表示とする。

 $K_t \cdot \Delta \sigma_n = 2E \cdot (0.415 \cdot N_c^{-0.606} + 0.00412 \cdot N_c^{-0.115}) \quad (4)$

この表現では扱いの単純化のためもあって,横方向の応 力成分,応力集中係数と疲労強度減少係数の関係,材料の 繰返し軟化,硬化,平均応力の効果などを無視している。

3.4 疲労亀裂の進展寿命計算

応力拡大係数 K をもとに Paris 則により亀裂の進展計 算を行なう。応力拡大係数を求めるには亀裂を想定する場 の応力分布が必要となる。ビード止端を切欠底と考えると, 応力集中場の応力分布は Glinka¹¹⁾の提示した次式で表示 できるとされている。

$$\sigma_y = \frac{K_t \cdot \sigma_n}{2\sqrt{2}} \left\{ \left(\frac{\rho}{r}\right)^{-1/2} + \frac{1}{2} \left(\frac{r}{\rho}\right)^{-3/2} \right\} \times \left\{ 1 - \frac{\rho}{2t_1} \left(\frac{r}{\rho} - \frac{1}{2}\right) \right\}$$
(5)



Fig. 6 Stress Distributions near Undercuts

日本造船学会論文集 第170号

698

ここで σ_u: 亀裂と直角方向の直応力

ρ:切欠先端半径

 $r-\frac{\rho}{2}$:切欠先端からの距離

(5)式の応力分布表示とアンダーカット付継手の応力分布 計算結果を Fig.6 に比較する。(5)式は簡単な表示式であ るが切欠底近傍では良い近似を与えていることがわかる。 応力分布が分かれば応力拡大係数は次式で計算できる。

$$K = \int_0^a \sigma_y \cdot G(x, a) dx \tag{6}$$

ここで

a:亀裂寸法

G(x, a): 重み関数

実際の計算では**亀裂**全長を適当に区分し離散的に応力拡 大係数を求めた。

亀裂が切欠底半径以上板厚方向に進展して板厚に対し無 視できない寸法にまで成長してくると, K 値に対して板厚 の影響を算入する必要が生じてくる。帯板の片側亀裂の 解¹²⁾ に漸近させ板厚影響を考慮する。すなわち, 引張荷重 と曲げ荷重の場合それぞについて(6)式と次式を結合す る。

(軸力引張の場合)

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \times f_1\left(\frac{a}{t_1}\right)$$
(7)
$$f_1 = 1.122 - 0.231 \cdot \left(\frac{a}{t_1}\right) + 10.55 \left(\frac{a}{t_1}\right)^2 - 21.72 \cdot \left(\frac{a}{t_1}\right)^3 + 30.39 \left(\frac{a}{t_1}\right)^4$$

(曲げ荷重の場合)

$$K = \sigma_b \sqrt{\pi a} \times f_2 \left(\frac{a}{t_1}\right)$$

$$f_2 = 1.122 - 1.40 \left(\frac{a}{t_1}\right) + 7.33 \left(\frac{a}{t_1}\right)^2 - 13.08 \left(\frac{a}{t_1}\right)^3$$

$$+ 1.40 \left(\frac{a}{t_1}\right)^4$$
(8)

具体的に(7),(8)式にK値を漸近させる方法として, (6)式から得られるK値を K_1 ,(7),(8)式から得られる K値を K_2 として, $K_1 \times K_2/1.122 \ge K_2$ の大きい方をとっ た。

このような手順に従って板厚 22 mm, リブ板板厚 10 mm, 止端半径 1 mm, 引張荷重条件の K 値を計算し,止端半径 0 の有限要素法解,長谷部らが求めている半解析解と比較 すると Fig.7 のようになる。Glinka の応力分布をもとに簡 単に精度良く K 値が計算できているのがわかる。

以上は亀裂を板幅方向に一様な亀裂を考えた扱いである がここでは亀裂の発生形状と進展形状について仮定を設け る。すなわち,溶接ビード止端に発生する亀裂は,亀裂深 さ $a_0=0.1 \text{ mm}$,表面長さ $2b_0=0.4 \text{ mm}$ の半楕円表面亀裂 であると仮定する。亀裂が成長して深さa=2 mmの段階



Fig. 7 Stress Intensity Factors of Cracks Emanating from the Toe of the Weld

でビード止端全長に一様に拡がる2次元貫通亀裂になると する。亀裂の半楕円形状は次式で与える。

$$a = -3.8 \times \left(\frac{a}{b}\right) + 2 \tag{9}$$

引張応力下の半楕円表面亀裂と2次元貫通クラックの比を 用いて K 値を修正し深さ2mm までの半楕円クラックの K 値とする。修正係数 M_k は次式で与える¹³⁾。

$$M_{k} = \left\{ 1 - 0.091 \cdot \left(\frac{a}{b}\right) \right\} \cdot E(k)$$

$$E(k) = \int_{0}^{\pi/2} \sqrt{1 - k^{2} \sin^{2} \varphi} \, d\varphi$$

$$k^{2} = 1 - \left(\frac{a}{b}\right)^{2}$$
(10)

以上で応力拡大係数 K 値の準備は整う。

次に進展条件式を考える。ビード止端近傍には引張の溶 接残留応力が存在していて,一度発生した亀裂は開口状態 での変形を繰返す。亀裂の進展条件を考えるときは閉口状 態を考えて閾値 ΔKrH を考えるよりも変動範囲 ΔK の全 領域が進展に寄与すると考えて良いように思われる。ここ では計算の容易さも考慮して Paris 則で進展条件式を与え る。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \tag{11}$$

低中強度鋼の材料定数 c と m については多数の報告があ るが甚しくばらつきが大きい。降伏点 314 MPa 級鋼の例を Fig.8^{14),15),16),17)} に示す。ここではその中から Maddox の提 唱している関係を用いて次の値を採用する。

 $c = 2.57 \times 10^{-12}$

m=3.2 (単位:MPa, m) 以上の関係を用いて、初期表面亀裂深さ $a_0=0.1$ mm, 最終 亀裂深さ $a_f=0.5 \times t_1$ (t_1 :部材板厚)として亀裂の進展寿 命を計算した。

主板板厚 $t_1=22 \text{ mm}$, リブ板板厚 $t_2=10 \text{ mm}$, アンダーカ ットなしのリブ十字継手についての進展計算結果を Fig.9 に示す。亀裂が 2 mm 深さまで進展する間に寿命の大半が



Fig. 8 Crack Growth Rate of Medium Strength Steels



Fig. 9 Toe Radius Influences on the Crack Growth



Fig. 10 Thickness Effect on Crack Growth Life of Fillet Welds



Fig. 11 Influence of Undercut Depths on Crack Growth Life of Fillet Welds

費されること,止端半径の進展寿命に対する影響はさほど 大きくないことがわかる。Fig.10 と Fig.11 は進展寿命に 及ぼす主板板厚の効果とアンダーカット深さの影響を引張 応力繰返し範囲,曲げ応力繰返し範囲 Доn=196 MPa の場 合について計算した結果である。応力集中係数の変化傾向 に合わせて進展寿命が影響を受けている。

3.5 疲労寿命に対する板厚の効果

目視亀裂発生寿命 Nc と亀裂の進展寿命 Np を組合せて, (社)日本造船研究協会 SR 202 部会¹⁸⁾ で実施された一連の





Fig. 12 Thickness Effect Estimations of Cruciform Fillet Welds under Tensile Loading



Fig. 13 Thickness Effect Estimations of Tee Fillet Welds under Bending Loading

板厚効果に関する実験結果について比較計算を実施してみ た。ビードフランク角 θ =50°,止端半径 ρ =1 mm は一定と して、板厚、脚長の寸法条件は試験片条件をそのまま入力 した。Fig.12 と Fig.13 は試験で得られた破断寿命結果を 点で示し、計算結果を曲線として対照している。Fig.12 は 引張荷重試験の場合で、Fig.1(a)はリブ板板厚を主板板 厚の1/2 としたシリーズで板厚効果が明瞭に出たシリーズ であり、Fig.1(b)はリブ板板厚を一定として板厚効果が はっきりとはしなかったシリーズである。計算寿命は試験 結果と良く対応し、板厚効果の傾向も説明している。 Fig.13 には同じく曲げ試験結果を比較対照したが、同様の 結果となっている。

全体的には破断寿命が 3×10⁶回を超えると計算寿命が 試験寿命を上回り対応が悪くなる。平均応力の影響を無視 して長寿命領域まで(3)式を形式的に適用したために亀裂 の発生寿命を過大に評価しているのが原因である。本方式 で全寿命領域に対し推定精度を向上させるためにはビード 止端の条件を想定して(3)式を修正することが必要となろ

う。

4. アンダーカットを有する隅肉継手の寿命予測

疲労試験を実施した3系統の隅肉継手について寿命計算 を行なった。アンダーカットはFig.2を参照して、先端半 径 $\rho=1 \text{ mm}, 7 \Rightarrow \gamma 2 \phi \beta = 50^{\circ} \text{ oV}$ 字切欠きとし、Fig.5 の応力集中係数 K_i を用いた。隅肉十字継手引張試験の結 果をFig.14 に、T継手曲げ試験の結果をFig.15 に示す。 図中のデータ点は、亀裂の発生起点近傍の最大アンダーカ ット深さを段階区分している。寿命計算結果を曲線で示し ている。

計算寿命は応力集中係数に依存している。Fig.5でアン ダーカットが 0~0.3 mm で大きく変化するのを反映し て,アンダーカットなしとアンダーカット 0.3 mm の間で 計算寿命は大きく変化した。試験結果は大きくばらついて いる。微小なアンダーカットの存在がばらつきを助長して いるのか,単なるデータのばらつきなのか判然としない。 深さが 1 mm, 2 mm になると計算寿命も試験寿命も大幅









に短くなっていて、全体的傾向としては良くあっているように思われる。

荷重形式ごとに試験データと計算寿命の対応を調べてみ ると, Fig.14の引張荷重試験結果については試験寿命の精 度良い推定となっているのに対し, Fig.15の曲げ荷重試験 では試験値よりいく分短寿命の評価をしている。十字継手 とT継手の溶接残留応力の差が原因となっているのか,引 張荷重と曲げ荷重の荷重モード間で一般に観察される強度 差なのか明確でないが検討の余地ある項目である。引張試 験片の角変形を考慮すると差は小さくなるが,長寿命側の 推定精度向上と合わせて残る検討項目である。

個々のデータ点について、寿命の計算値と試験データの 比をとり計算精度を確認した。Fig.16はC1継手について の検証結果である。(a)はクラックの発生したアンダーカ ット深さを入力して計算した結果で、(b)は継手の目標ア ンダーカット深さを入力、計算した結果である。個々の試 験値はもちろん寿命のばらつきを含んだ値である。2×10⁶ 以上の長寿命領域で計算値が著しく大きくなっているこ



(a) Actual Undercut Depth



(b) Joint Average Undercut Depth



と、また、全体のばらつき具合から判断すると、個々のア ンダーカット深さよりも、ビード全体を通してのアンダー カット深さを用いた方が計算との照合は良く、あるいはこ のような継手全体の出来栄えのようなものが継手強度の差 には影響しているのかも知れない。

Fig.17 と Fig.18 には、継手系列ごとにデータを同一寿 命に回帰してアンダーカットの影響を示した。回帰の方法 702

日本造船学会論文集 第170号







は、公称負荷応力と寿命の関係を $\Delta o_n = C \cdot N^n$ で表現できるとして、10⁵ 回強度、10⁶ 回強度を計算より求め、係数 mを算出し、実試験データに先の関係を当てはめて 2×10^6 回強度を求めるという方法である。個々の試験寿命のばらつきが強度のばらつきとなって現われる上に、試験継手の真

の m の値と計算から求めた m の値が異なるとその差がば らつきとなって現われるのでばらつきが拡大された形にな っているが、アンダーカットの強度に及ぼす影響の凡そは 把握できる。図では継手の各シリーズ(アンダーカットの 目標値) で記号を区分して実深さと対照させ,計算強度を 曲線で示している。Fig.17は引張荷重試験結果を整理した もの, Fig.18 は曲げ試験結果を整理したもので,全体にア ンダーカットが深くなると強度が低下する一方でばらつき も大きくなることがわかる。ビード外観と一般的には対応 する継手のシリーズ区分で強度の序列が決まる傾向にあ る。引張荷重試験の場合、強度のアンダーカット依存性は ほぼ計算により推定できたが、曲げ荷重試験の場合には推 定精度が下がる。しかし、アンダーカット深さが0.3mm, 1.0 mm であると強度がそれぞれ約 10%, 30%低下すると 定量的評価として得られているので、疲労強度との関連か ら制限値を設ける場合にはひとつの有力な根拠となりうる と思われる。

5. 結 言

これまで溶接継手の強度確性には,対象の継手を製作し 疲労試験を実施することが必要と考えられてきた。SR 202 部会におけるアンダーカット試験も同様の趣旨で計画,実 施されて,アンダーカット影響を裏付ける貴重なデータが 得られた。しかし,試験は限られた条件でのデータを示す のみで,荷重条件が変わったり,形状・寸法が相違する場 合の強度推定には別の試験が必要となる。著者らはこのよ うな疲労強度,疲労寿命の算定に対して構造設計計算的な 方法で評価・解析する手法の導入を図り,同部会における 溶接継手試験の結果に適用を試み,試験データとの比較検 証を進めたものである。本研究を通じて得られた主要な結 論は以下の通りである。

(1) ビード止端のアンダーカットは溶接継手の疲労強 度に影響を持ち,アンダーカット深さが1mmにもなると 強度は 30%も低下する。

(2) 隅肉溶接継手の疲労寿命 N_f は目視亀裂の発生寿 命 N_c と亀裂の進展寿命 N_p の和として求めることができ る。ここで N_c はビード止端の局部応力繰返しから求める ことができ, N_p は Paris 則によって計算できる。

(3) アンダーカット形状を先端半径 $\rho=1.0 \text{ mm}$ のV 字状切欠きとしてモデル化し応力集中係数 K_t を計算して N_c , N_p を求めて破断寿命 N_f を導き試験結果と比較する と,計算値と実験値の間に良い一致がみられた。寿命計算 方法の有効性が確認された。

(4) 本計算方法はビード止端の応力集中をモデル化す ることができれば広い範囲の形状条件,荷重条件に適用が 可能である。また,ビード止端の個別の条件について影響 度を定量評価できる。

本報告で提案している寿命計算法は,適用の試みを始め たばかりで,ビード止端の条件,疲労亀裂の発生などでい くつかの単純化,条件の切り捨てを行なっている。今後, 適用の範囲を拡げるため,亀裂の発生寿命に関する平均応 力の項をはじめとして,実験的・理論的調査を進めたいと 考えている。

謝 辞

本報告は(財)日本船舶振興会の補助事業として実施され た(社)日本造船研究協会,第202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」工作法分科会(藤 田 譲 部会長,辻 勇 分科会主査)の実験研究を紹介 し,疲労寿命に関する構造設計的な計算方法の適用可能性 を検討したものである。実験研究は造船5社(三菱重工業, 石川島播磨重工業,日立造船,三井造船,住友重機械工業) が昭和61年度より分担実施してきた。疲労寿命の計算方法 は,同工作法分科会の討議のなかから基礎式が生まれ,結 実したものである。試験を分担実施された各社に対し,ま た,貴重な御意見,御討論を頂いた藤田部会長を始めとす る同部会各位に対し深甚な謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) Department of Energy, UK; "Offshore Installations: Guidance on design construction", 1984
- Det Norske Veritas, Norway, "Classification Notes, Note No. 30. 2, Fatigue Strength Analysis for Mobile Offshore Units", 1984
- Petershagen, H., "The Influence of Undercut on the Fatigue Strength of Weld", IIW Doc. XIII-1120-84, 1984.
- 4) 石井勇五郎, "溶接欠陥の強度に及ぼす影響",溶接 構造物の強度と破壊第20回講習会テキスト,溶接 協会,1970.
- 5) 飯田國廣他, *鋼隅肉溶接継手の曲げ疲労強度に及 ぼす隅肉形状等の影響",造船学会論文集,第143号, 1978
- 6) 日本造船学会, "Japan Offstore Quality Standard (JOQS)", 1986
- Onozuka, M. et al., "The Effect of the Plate Thickness on the Fatigue Strength", preprint of EVALMAT 89, 1989
- 後川理 他, "溶接継手部の応力集中係数",石川島 播磨技報,第23巻,第4号,1983
- 辻勇,"非荷重伝達型すみ肉溶接継手の応力集中係数の推定式",西部造船会会報,第80巻,1990
- 10) Iida, K. et.al, IIW Doc. XIII-816-77, 1977
- Glinka, G., "Calculation of Inelastic Notch-Tip Strain-Stress Histories under Cyclic Loading", Eng. Fract. Mech., Vol. 22, No. 5, 1985
- 12) Edit. by Murakami, K., "Stress Intensity Handbook", JSMS, Pergamon Press, 1986
- 13) Ishida, M. et. al., "Tension and Bending of Finite Thickness Plate with a Semi-elliptical Surface Crack", Int. J. Fract., Vol. 26, 1984
- 14) 松本重治他、"新制御圧延法 TMCP により製造した
 50 kgf/mm² 級高張力鋼の疲労特性",川鉄技報,第
 17 巻,第1号,1985
- 15) *金属材料疲労き裂進展抵抗データ集″,日本材料学 会,1983
- Maddox, T., The Welding Institute Report E/29/ 69, 1969
- 17) 北川英男他, 日本機械学会誌, 75-642, 1972
- 18) 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 報告書", 日本造船研究協会,1991