―影響係数データベースを用いた表面き裂進展解析の高精度化・簡易化―

正員山下洋一* 正員阪野賢治* 白鳥正樹**

Improvement of Prediction Ability of Fatigue Crack Growth Analysis —A simplified method of fatigue crack growth analysis using database of influence coefficients—

by Youichi Yamashita, Member Kenji Sakano, Member Masaki Shiratori

Summary

In this study, the authors have developed a software system based on influence function method using 3 D-FEM input data and 3 D-FEM result to improve prediction ability of fatigue crack growth analysis of surface cracks which initiates from root of boxing fillet welded joints of ship structures. The software system developed in this study uses the database of influence coefficients, K_{ii} , developed by one of the authors, Shiratori, for various types of surface crack through a series of FE-analyses. It is shown that crack growth result based on influence function method using 3 D-FEM result is more accurate for experimental data than the result by a method based on linear approximation of arbitrary distributed stress in the cross section of virtual crack surface are determined to simplify crack growth analysis based on influence function method. Surface crack growth analysis based on influence function method using the approximate equation gives almost the same result of that based on influence function method using the 3 D-FEM result.

1. 緒 言

船体構造におけるブラケット端部回し溶接部ビード止端 は,船体の主要な疲労き裂発生箇所である。ブラケット端 部の応力集中部から発生した表面き裂の進展解析をWES -2805¹⁾,ASME Code Sec. XI²⁾,BSI PD 6493³⁾等の規格 による方法で行うと,板厚方向の非線形な応力分布を直線 近似し引張応力成分と曲げ応力成分に分離して応力分布の 標準化を行うことになる。この場合,特に角回し溶接部の ように付加物と溶接ビードの影響のため板厚方向だけでな く板幅方向にも非線形な応力分布が生じる場合には,応力 分布を安全側に評価する傾向がある。そのため,き裂進展

* 石川島播磨重工業株式会社基盤技術研究所

** 横浜国立大学工学部生産工学科

原稿受理 平成 12 年 1 月 11 日 春季講演会において講演 平成 12 年 5 月 18,19 日

解析に用いる応力拡大係数(以下,K値)の解析精度は よくないと考えられる。本研究では,表面き裂面の応力分 布をなるべく正確に考慮すれば表面き裂疲労進展解析の高 精度化を実現することができると考え,任意分布応力下で の表面き裂の K 値を算出可能な影響関数法4^-7)を用いる ことにより解析精度の向上を目的とした。著者の一人白鳥 は,3次元表面き裂の深さ方向及び幅方向に任意に分布す る応力に対して,影響関数法によりき裂前縁の K 値を効 果的に評価する方法を提案している5^~7)。提案された方法 は、表面き裂のき裂面の一つの節点に単位力を受けるき裂 のK値をデータベースとし,き裂のない部材の応力解析 より得られる仮想き裂断面の応力分布から,K 値の重ね 合わせの原理に基づいて K 値を解析する手続きをとる。 その方法を可能とするための,平板表面き裂,1/4 コーナ ーき裂、丸棒・ロータ・パイプ中の表面き裂など各種表面 き裂に対する K 値のデータベース(影響係数のデータベ ース)が作成されている5)~9)。また,影響係数データベー スを用いて影響関数法による K 値計算及び表面き裂疲労

進展解析をパーソナルコンピューター上で実現できるシス テムが開発されていることが報告されている^{10)~13)}。しか し、それらのシステムでは、仮想き裂断面の応力分布の近 似式(多項式)を作成して入力する必要があり、仮想き裂 断面の応力分布が複雑になる場合には、応力分布の近似式 を作成する際に困難が生じることがあった。

本研究では,上記影響関数法によるき裂進展評価を3次 元 FEM 入力データ(汎用有限要素コード ABAQUS によ る解析用入力ファイルの節点座標,要素結合データ)及び 3次元 FEM 解析結果を直接利用して解析するソフトウェ アシステムを開発した。また,さらに簡便化のために,本 来3次元の応力解析から求める必要がある仮想き裂断面の 応力分布を,2 次元の応力解析から求まる応力集中係数を 用いて予測する近似式を作成する方法を決定した。この近 似式は、影響関数法によるき裂進展解析の簡便化のために 有効である。以上の方法に基づき,ブラケット端部溶接ビ ード止端の応力集中部から発生する表面き裂を対象とし て,き裂進展解析を実施した。3 次元 FEM 解析データを 直接利用する影響関数法が仮想き裂断面の任意応力分布を 表す多項式を作成せずに解析できる有効な方法であること を示した。また,2 次元の応力解析から求まる応力集中係 数により仮想き裂断面の応力分布を予測する近似式を用い た影響関数法によるき裂進展解析の結果が、3 D-FEM 解 析結果を直接用いた場合とほぼ一致することを示し,近似 式が有効であることを示した。

2. 実 験

日本海事協会規格船体構造用高張力鋼 KE 40 (TMCP 処理,板厚 25 mm)を供試材とした。供試材の化学成分, 機械的性質を Table 1 および Table 2 に示す。

試験体形状寸法及び荷重負荷状態(4点曲げ)をFig.1 に示す。試験片の溶接は、被覆アーク溶接を用いた。溶接 条件は、電流200~210(A),電圧25~30(V),入熱量 20~25k(J/cm)である。疲労試験におけるき裂形状・

Table 1 Chemical composition of KE 40 steel used (mass%)

С	Si	Mn	Р	S
0.1	0.28	1.38	0.008	0.004
Cu	Ni	Cr	Nb	
0.01	0.02	0.03	0.01	

Table 2 Mechanical properties of KE 40 steel used

Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation(%) (Gauge length : 200mm)	
454	560	21	

寸法は、ビーチマーク法を用いて測定した。疲労試験の試 験条件は、応力範囲 $\Delta \sigma = 127.5$ MPa、応力比(最小公称 応力/最大公称応力)R=0.1 とした。また表面き裂の幾何 形状定義は Fig. 2 に従った。

3. 試験片の弾性応力解析

き裂進展解析に用いる応力情報を得るため,試験体の FEM 弾性応力解析を行った。Fig.1の回し溶接部を有す る試験体を6面体ソリッド要素(8節点)及びシェル要素 によりモデル化し,応力解析を行った。ソリッド要素によ る解析(以下,3D-FEM)は,汎用コードABAQUS Ver.5.7を用い,シェル要素による解析は,汎用コード





Fig. 1 Configuration of boxing fillet welded joints specimen and loading condition



Fig. 2 Geometrical definition of surface crack



Fig. 3 3 D-solid FEM model of specimen (1/2 model)



Fig. 4 Shell FEM model of specimen (1/2 model)

NASTRAN Ver. 70 を用いた。それぞれの要素分割図を Fig. 3, Fig. 4 に示す。ソリッド要素による解析は後に述 べる 3 D-FEM 解析データを利用した影響関数法によるき 裂進展解析を実施するためであり、シェル要素の応力解析 は、仮想き裂断面の応力分布の近似式を作成するのに必要 な構造的応力集中係数 Ks を把握するためである。

4. き裂進展解析手法

4.1 き裂進展則及び各定数

本研究では、き裂進展則は式(1)に示す Paris 則に従う こととする。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \tag{1}$$

Paris 則の材料定数, *C*, *m* は, *C*=1.907×10⁻¹², *m*= 3.2 (単位は, da/dN: *m*, ΔK : MPa \sqrt{m}) とした (強度 が同程度の SM 50 B のデータを用いた¹⁴)。また, 初期き 裂寸法は, *a*=10.5 mm, 2*c*=41.5 (繰返し数 *N*=7.40× 10⁵ における寸法) とした。

4.2 従来法1),15),16)

本研究では、従来法を板厚方向非線形分布応力を直線近 似して解析する方法^{11~3}(直線近似法①とする)とした。 K値計算における応力範囲の標準化(直線近似)の方法 は、Fig.5に示すように表面の応力値とき裂最深部の応力 値を直線で結び近似する。そして、表面側応力範囲を $\Delta \sigma_1$,裏面側応力範囲を $\Delta \sigma_2$ として応力成分を Fig.5 中に 示す引張応力成分 $\Delta \sigma_t$ と曲げ応力成分 $\Delta \sigma_b$ に分けるとい



Fig. 5 Linear approximation of arbitrary distributed stress

う近似方法になっている。従って,角回し溶接部の様に, き裂発生点の応力集中が大きく,また,応力集中の影響で 特に板厚方向だけでなく板幅方向にも非線形な応力分布に なる場合には,十分に安全側の予測になる傾向があると考 えられる。なお,従来法では,引張応力成分及び曲げ応力 成分に分離したあとは,Newman & Raju¹⁵⁾の平板中の表 面き裂のK値計算式に従って,その時のき裂寸法に対し てK値を計算しながらき裂進展解析を進めていくことに なる。

また,従来法において,非線形な応力分布を考慮するた めの Fig. 6 に示す計算モデルによる最深部(き裂底) A 点の K 値に対する補正係数 F_{gA} を導入したケースについ ても検討した(直線近似法②とする)。 F_{gA} は,非線形な 応力分布を考慮するための補正係数であり,貫通き裂がき 裂面に開口力をうける場合の影響係数として与えられる式 (2)を用いた¹⁶⁾。つまり,Newman & Rajuの算出式に式 (2)の応力分布に対する補正係数を導入して K 値を計算 することになる。さらに, F_{gA} 及び板表面の点に対する K 値の(き裂底に対するものと同様な)補正係数 F_{gc} を導 入した場合についても検討した(直線近似法③とする)。



Fig. 6 Calculation model of correction factor F_{gA}

$$F_{gA} = \left(\frac{2}{\pi}\right) \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_n}\right) \left[\arcsin\left(\frac{a_{i+1}}{a_i}\right) - \arcsin\left(\frac{a_i}{a}\right) \right]$$
(2)

 F_{gc} は同様な形の式(3)で表されるとした。

$$F_{gc} = \left(\frac{2}{\pi}\right) \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_n}\right) \left[\arcsin\left(\frac{C_{i+1}}{C_i}\right) - \arcsin\left(\frac{C_i}{C}\right) \right]$$
(3)

ここで, oi は,き裂面に作用する板厚または,板幅方向の分布応力であり,3D-FEM 解析から決定した。

4.3 3 D-FEM 解析データを直接用いた影響関数法き裂進展解析法

4.3.1 影響関数法及び影響係数データベース5)~9)

著者らの一人である白鳥によって開発された影響関数法 は、表面き裂の板厚方向・板幅方向に任意に分布する応力 に対して、表面き裂のき裂底及び板表面のK値を評価す る方法である。その方法は、K値の重ね合わせの原理の 基づいている。任意分布応力を受けるき裂のない部材の仮 想き裂断面の応力分布により、影響係数が定義されている 節点での任意分布応力 σ; を求めれば式(4)によりき裂底 及び板表面でのK値を求めることができる。

$$K_i = \sum_{i=1}^{n} K_{ij} \sigma_j \tag{4}$$

ここで、 K_{ij} が影響係数である。 K_{ij} は、白鳥により各 種表面き裂に対してデータベースとして求められてい る^{5)~9)}。また、nは、 K_{ij} が定義されているき裂面上の節 点の数、 K_i は表面き裂前縁の節点における K 値を表す。 本論文では、き裂底の節点で Ka、板表面で Kc とする。

4.3.2 開発したシステムと解析の手順

本論文では,FEM 入力データと応力に関する解析結果 から直接,式(4)における σ_iを求めることにより,影響 関数法により K 値計算およびき裂進展解析を行うソフト ウェアシステムを開発した。これによれば,仮想き裂断面 における応力分布を多項式近似するなどして予測式を作成 する必要がなく,高い精度が期待できる影響関数法による K 値計算及びき裂進展解析を容易に行うことができる。

次の(1)~(4)に解析の手順を示す。



Fig. 7 System flow chart of fatigue crack growth analysis based on infuluence function method using 3 D-FEM result

- (1) 汎用有限要素解析ソフト ABAQUS (Ver. 5.7) に よりき裂を想定する部材のソリッド要素(6面体8節 点)による応力解析を行う。その際,き裂を想定する断 面にき裂はないものとして解析を行い仮想き裂断面に垂 直な応力の分布を把握する。
- (2) CAE ソフト MSC PATRAN (Ver. 8.0) により仮 想き裂断面上の節点における応力値を出力させる。
- (3) 形状関数を仮想き裂断面(き裂のない断面)の要素 分割に適用し, *K_{ii} データベースの*各節点の座標値から その節点での応力値を近似的に求める。
- (4) 以上までで、K_{ij}が定義されている各節点での応力 値が求まるので、式(4)によりき裂底及び板表面のK 値が求められる。

以上の解析システムの全体構築図を Fig.7 に示す。

4.3.3 開発したシステムの詳細

3 D-FEM 解析結果から直接解析可能とするソフトウェ アの概要について示すことにより解析方法について以下に 述べる。

① き裂タイプ選択

開発したシステムでは、平板中表面き裂,平板中1/4コ ーナーき裂,丸棒中表面き裂,ロータ中軸方向表面き裂, パイプ中軸方向表面き裂及びパイプ中の周方向内側・外側 表面き裂のK解析及びき裂進展解析が可能となっている。 ソフトウェアにおける表面き裂のき裂タイプの選択画面を Fig. 8 に示す。

② データファイル読み込み及び K_{ij} 定義点における応力
 算出

汎用有限要素解析コード ABAQUS による 3 D-FEM 解 析を実施した後,その解析結果を直接利用するため, CAE ソフト PATRAN により仮想き裂断面の節点におけ る応力値をファイル (仮に JOBID. rpt とする)で出力さ せる。そして, ABAQUS により解析を実施するためのモ デルデータ (節点座標値及び要素結合データ)ファイル



Fig. 8 Selection of surface crack type for analysis



Fig. 9 Input of data files and determination of crack location

(仮に JOBID. inp とする)を応力分布データファイル JOBID. rpt とともにソフトに読み込ませる。ここでのソ フトウェア上の入力画面を Fig. 9 に示す。

ここで,上述の2つのファイル以外の入力情報として は,次の(a)~(e)が必要である(Fig.9の画面中央にて 入力)。

(a) 3D-FEM モデルの仮想き裂断面が xyz 座標系において平行な断面(xy 断面, yz 断面または zx 断面)

- (b) き裂発生点の3D-FEM モデル上の節点
- (c) 仮想き裂断面とそれに垂直な軸の交点の座標値
- (d) 表面き裂が進展する深さ方向の軸と正負の方向
- (e) 表面き裂が進展する板表面方向の軸と正負の方向

以上から,き裂が発生する位置と進展する方向をソフト ウェア内で定めることができる。その後,JOBID.inp に て仮想き裂断面に接しているソリッド要素を選択し,Fig. 10に示すように,そのソリッド要素の仮想き裂断面に接 している面を新たに平面要素として定義する。

定義した平面要素の親座標(*X*-*Y*座標)系と正規化 座標(*ξ*-η座標)系の対応を式(5)のように定義する。





日本造船学会論文集 第187号

$$X = \sum_{i=1}^{L} N(\xi, \eta) x_i$$

$$Y = \sum_{i=1}^{L} N(\xi, \eta) y_i$$
(5)

ここで、 $N(\xi, \eta)$ は、定義した平面要素の形状関数である。 (x_i, y_i) は、平面要素中の節点座標値である。Lは、1 つの平面要素を構成する節点数である。例えば、3D-FEM 解析に6面体8節点ソリッド要素を用いた場合、定 義した平面要素は4個の節点により構成される。その場合 の形状関数は式(6)で表すことができる。

$$N(\xi, \eta) = \frac{1}{4} (1 + \xi_i \xi) (1 + \eta_i \eta) \quad i = 1 \sim 4$$

$$(\xi_1, \eta_1) = (-1, -1), \ (\xi_2, \eta_2) = (1, -1), \ (\xi_3, \eta_3) = (1, 1),$$

$$(\xi_4, \eta_4) = (-1, 1)$$

(6)

また,定義した平面要素内の任意分布応力を式(7)のように定義する。

$$\sigma(\xi,\eta) = \sum_{i=1}^{L} N(\xi,\eta) \sigma_i \tag{7}$$

ここで、 σ_i は、平面要素の節点応力値である。この応 力値は、上述の JOBID. rpt で与えられている。次に、 K_{ij} が定義されている点 (x, y) が含まれている平面要素を定 める。そして、(x, y) における応力値 σ_i を求めるため、 (x, y) に対応する正規化座標系での (ξ, η) の位置を近似的 に求めることにした。まず、Fig. 10 に示すように、(x, y)を含む平面要素を正規化座標系で ξ 方向及び η 方向にそ れぞれ 2*M* 分割し、平面要素上に $(2M+1)^2$ 個の点 (ξ_k, η_l) (ただし、 $k=1, 2, \dots, 2M+1, l=1, 2, \dots, 2M+1$) を定義する。式(5)の関係から次の式(8)のように求まる (x_{ij}, y_j) と(x, y) の距離が最も小さいときの (x_j, y_j) を近 似的に K_{ij} が定義されている(x, y) とする。その時の (ξ_k, η_l) を (ξ_p, η_q) とする。

$$\begin{aligned} x_j &= \sum_{i=1}^{L} N(\xi_k, \eta_i) x_i \\ y_j &= \sum_{i=1}^{L} N(\xi_k, \eta_i) y_i \end{aligned} \tag{8}$$

以上から, (x, y) における応力値を式(9)から求めるこ とができる。この手続きを K_{ii} が定義されている各節点に 対して行い,それらの節点の応力値を決定した。

$$\sigma(\xi_{p}, \eta_{q}) = \sum_{i=1}^{L} N(\xi_{p}, \eta_{q}) \sigma_{i} \tag{9}$$

③ K_{ii} データベースが存在するき裂寸法に対するき裂底 及び板表面での K 値計算

本論文で用いた平板中の表面き裂の K_{ii} が求められてい るき裂寸法は次の通りである。

- アスペクト比 a/c=0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 1.0, 2.0
- き裂深さ板厚比 a/t=0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8

これらの寸法に対するき裂底及び板表面での K 値を式 (4)により求めることができる。K 値補正係数の計算結 果を表示した画面の一例を Fig. 11 に示す。表示される値

は式(10)で表される補正係数 F の値である。ただし,式 (10)で ω は半楕円表面き裂の中心の応力値である。

$$F = K/\sigma_0 \sqrt{\pi a/Q}$$

$$Q = 1 + 1.464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65}$$
(10)

④ き裂進展解析

き裂進展則及び Paris 則を指定する入力画面で入力が終 了するとその後に Fig. 12 に示す画面にてき裂進展解析を 実施することができる。

⑤ システムの精度検証

本論文の方法により開発したソフトウェアのK 値算出 の検証のため、一様引張応力下及び曲げ応力下における K 値の補正係数を求め、現在もっとも広く用いられてい る Newman & Raju の平板中のK 値計算式による補正係 数と比較した。結果を Fig. 13(a)~(d)に示す。

これより、影響関数法の結果と Newman & Raju の計 算式による結果はよく一致している。このことから、本シ ステムによる影響関数法による解析の精度検証ができたも のとした。



Fig. 11 Table of correction factor F



Fig. 12 Result of crack growth analysis



Fig. 13 Correction factor F under uniform tension or bending

4.4 応力集中係数を用いた近似式による影響関数法き 裂進展解析

影響関数法に基づいたき裂進展解析を行うには、き裂形 状を模擬せずモデル化すればよい。それでも 3 D-FEM モ デル作成には、多少の時間を要する。そこで、本来 3 D-FEM 解析から求める仮想き裂断面の応力分布を、シェル 要素を用いた 2 次元 FEM 解析や弾性力学に基づく解析か ら求まる応力集中係数から予測する一般的な近似式があれ ば、き裂進展解析の簡便化に対して有効である。そこで、 まず、本研究でき裂進展解析の対象とした角回し溶接部か ら発生したき裂が進展する断面の応力分布の近似式を作成 することを検討した。すなわち、溶接ビード止端部の局部 の応力集中係数 K_w 及びシェル要素 FEM 解析結果から SR 202 B 法¹⁷⁾ により求まる構造的応力集中係数 K_s を用 いて近似式を作成することを試みた。これにより角回し溶 接部からの表面き裂進展解析の簡便化を行い、近似式の有 効性を検証した。

角回し溶接部ビード止端の応力集中係数 K_t は,溶接ビードによる局部応力集中係数 K_wと構造的応力集中係数 K_sの積で求まるものとした。

$$K_t = K_w K_s = \sigma_{\max} / \sigma_n$$
 (11)
 σ_{\max} :付加物角回し溶接部止端の最大応力 (= σ_{m})

σn:公称応力

Kw:溶接ビード止端部の局部応力集中係数

Ks:構造的応力集中係数

局部応力集中係数 K_w については,各種溶接継手に対す る評価式が作成されている^{18),19)}。本試験片の場合,T字 隅肉溶接継手が曲げ負荷を受ける場合の式が近似的に使え るものとして辻が提案している結果を用いた¹⁹⁾。曲げ荷重 を受けるT字隅肉溶接継手の応力集中係数は,次の式で 与えられる。

$$K_{w} = 1 + \left\{ 0.629 + 0.058 \ln\left(\frac{S}{t}\right) \right\} \times \left(\frac{\rho}{t}\right)^{-0.431} \tanh\left(\frac{6h}{t}\right) f(\theta)$$

(12) 式(12)中の, f(θ)はフランク角に関する修正係数であり, 式(13)~式(15)で与えられる。

日本造船学会論文集 第187号

$$f(\theta) = \frac{1 - \exp\left(-0.90\sqrt{\frac{W}{2h}} \cdot \theta\right)}{1 - \exp\left(-0.90\sqrt{\frac{W}{2h}} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}$$
(13)

$$W = t + h \tag{14}$$

$$S = t_p + 2h_p \tag{15}$$

ここで, t:主板板厚, t_p:付加板板厚, h:付加板側脚 長, h_p : 主板側脚長, θ : フランク角, ρ : 溶接ビード止 端半径である。

局部応力集中係数はビード止端半径 ρ とフランク角 θ のばらつきの影響を受けると考えられる。Fig.14(a), (b)に小野塚らによる歯科用印象剤を用いた隅肉溶接継手 試験片のビード止端半径とフランク角の測定結果を(溶接 ビード止端のアンダーカットがある場合とない場合それぞ れについて)示す²⁰⁾。この結果を用いて,式(12)により求 めた局部応力集中係数とビード止端半径の関係を Fig. 15(a), (b)に示す。局部応力集中係数は*K*w=2.43 ~3.86の範囲でばらついていることがわかった。シェル要 素 FEM から SR 202 B 法に従って求めた構造的応力集中 係数は Ks=1.13 であったので,回し溶接部の応力集中係 数は,Kt=2.75~4.37の間にあることになる。

ビード止端半径及び局部応力集中係数に上述の平均値 $(
ho=1.09\,\mathrm{mm}, K_w=3.08)$ を用いると付加物角回し溶接部 止端の応力集中係数 Kt は,式(16)のようになった。

$$K_t = K_w K_s = 3.48$$
 (16)

一方、回し溶接部ビード止端から発生するき裂が進展す る仮想き裂断面の応力分布近似式 $\sigma(x,y)$ を式(17)の形に 仮定した。ここで座標系は Fig. 2 に従っている。

$$\sigma(x, y) = f(x)g(y) + \left\{\sigma_t + \sigma_b \left(1 - \frac{2y}{t}\right)\right\}$$
(17)

式(17)の右辺第一項を溶接ビード止端の局部の高応力成 分,第2項を公称応力成分と考えた。ただし, ot は公称 引張応力成分, σ₆は公称曲げ応力成分を表す。式(17)で は、f(x)が板幅方向の局部応力成分の変化を表し、g(y)が板厚方向の局部応力成分の変化を表すものとした。 f(x)については,角回し溶接止端部近傍の板幅方向の応 力分布の形を考え、式(18)に示す3次式を仮定した。







0.5







$$f(x) = \frac{2}{B^3} x^3 - \frac{3}{B^2} x^2 + 1$$
ただし、

$$B = 1.5 \left(\frac{t_p}{2} + h_p\right) = 0.75S : x \le B$$

$$f(x) = 0 : x > B$$

$$(18)$$

ここで、Bは付加板及び溶接ビードの応力集中の影響が 及んでいる距離を表しているものとした。この距離はS(式(15)参照)の大きさの影響を受けると考えられるが、3 D-FEM 解析の結果から、式(18)に示すように、B=0.75S=18 mm と仮定した。

g(y)については、切欠き底の応力分布 $\sigma(y)$ を表すとさ れている Glinka²¹⁾ の式(19)を参考にして、式(17)におい て、切欠き底の最大応力が $K_t(\sigma_t + \sigma_b)$ に、切欠きから板 厚方向に十分離れたところで、公称応力値に近くなるよう に式(20)の形に仮定した。

$$\sigma(y) = \frac{K_t}{2\sqrt{2}} \left[\left(\frac{\rho}{r}\right)^{1/2} + \frac{1}{2} \left(\frac{\rho}{2}\right)^{3/2} \right] \left\{ \sigma_t + \sigma_b \left(1 - \frac{2y}{t}\right) \right\}$$
tetz',

$$r = y + \frac{\rho}{2} \tag{19}$$



Fig. 16 Stress distribution along plate surface



Fig. 17 Stress distribution along plate thickness

$$g(y) = \frac{K_t - 1}{2\sqrt{2}} \left[\left(\frac{\rho}{r}\right)^{1/2} + \frac{1}{2} \left(\frac{\rho}{2}\right)^{3/2} \right] \left\{ \sigma_t + \sigma_b \left(1 - \frac{2y}{t}\right) \right\}$$
(20)

近似式(式(17),式(18)及び式(20))及び3D-FEMの 応力分布をFig. 16, Fig. 17に示す。Fig. 16は板表面の板 幅方向の応力分布である。Fig. 17は,板厚方向の応力分 布である。以上の近似式を用いて影響関数法によりき裂進 展解析を行った。

なお、本研究では、角回し溶接部からき裂進展解析を実施するため、式(17)の形の仮想き裂断面の応力分布の近似 式を作成したが、応力集中部から発生するき裂が進展する 仮想き裂断面の応力分布を予測する近似式の作成におい て、より一般的な場合に対しても適用可能であると考えら れる。

き裂進展解析結果及び考察

実験を行った4点曲げ疲労試験に対して、応力分布の直 線近似に基づく方法(直線近似法①)、板厚方向の応力分 布を考慮した補正係数(式(2))を導入した方法(直線近 似法②)、板厚方向・板幅方向の応力分布を考慮した補正 係数(式(2)及び式(3))を導入した方法(直線近似法 ③)、3D-FEM 解析結果を直接利用した影響関数法によ る方法及び仮想き裂断面の応力分布の近似式(ρ =1.09 mm, K_t =3.48)を用いた影響関数法による方法それぞれに ついてき裂進展解析を行った。き裂深さa,板表面半長c, アスペクト比a/c,き裂底K 値 K_a 及び板表面K 値 K_c に ついてそれぞれ Fig. 18 から Fig. 22 に実験結果とともに 示す。

3D-FEM 解析結果を直接利用する影響関数法による解 析の結果及び近似式を用いた影響関数法による解析の結果 はともに、十分安全側の結果を与える直線近似法よりも実 験結果に近い結果を与えており、応力集中部に存在する表 面き裂の進展解析に対して、有効な解析方法であることが わかった。直線近似法①から③について比較すると、応力



Fig. 18 Results of fatigue crack growth analyses (crack depth a-N)

237

日本造船学会論文集 第187号



Fig. 19 Results of fatigue crack growth analyses (crack length c-N)



Fig. 20 Results of fatigue crack growth analyses (a/c - a/t)



Fig. 21 Results of fatigue crack growth analyses $(K_a - a/t)$

分布を考慮した補正係数を導入した場合に実験結果に近づ く傾向がある。つまり,仮想き裂断面の応力分布を正確に 考慮するほど解析結果が改善されると考えられる。このこ とからも,影響関数法は角回し溶接継手ビード止端から発



Fig. 22 Results of fatigue crack growth analyses $(K_c - a/t)$







(b) F value for C-point



生する表面き裂の疲労進展解析に対して有効であるといえ る。また,3D-FEM 解析を直接利用する解析及び近似式 を用いた解析の4点曲げ試験片に対する補正係数(式(10) 参照)の計算結果をFig.23(a),(b)に示す。両者はよ く一致している。3D-FEM 解析からの直接解析の結果と 近似式による解析結果はほぼ同じ結果を与えることがわか り近似式が有効であることが確認できた。

一方,仮想き裂断面の応力分布の近似式において,局部 応力集中係数のばらつきによる解析結果への影響を検討す るため,Fig.15の局部応力集中係数が最大値及び最小値 になる場合と平均値の場合についてき裂進展解析を行った 結果をFig.24示す。これより応力集中係数のばらつきの 影響は小さいことがわかった。

次に,初期き裂寸法が小さい場合 (*a*/*t*=0.1)の検討を行った結果について Fig. 25 示す。この場合も,3D-FEM 解析結果を直接利用する解析結果と近似式を用いた解析結 果についての解析結果の差は大きくない。つまり,板厚の 8割までき裂深さが進展する寿命に対する局部応力集中係 数の影響は大きくない。従って,局部応力集中係数として 平均的な値 (*p*=1 mm)を用いた場合の近似式を用いて影 響関数法によりき裂進展解析を行えば,3D-FEM 解析を



Fig. 24 Effect of stress concentration factor on crack growth analysis result



Fig. 25 Effect of initial crack size on crack growth analysis result

直接利用する影響関数法の解析結果にほぼ近い結果を与え ると考えられる。

以上のように,式(17)の形で仮想き裂断面の応力分布近 似式を応力集中係数を用いて作成する方法は,他の一般的 な応力集中を有する部材のき裂進展寿命評価に対しても適 用可能な手法であると考えられる。

6. 結 言

応力集中部から発生するき裂進展解析手法の高精度化・ 簡易化のため,影響関数法による方法を検討した。以下に 本研究の結論を示す。

- (1) 3次元ソリッド要素を用いた FEM 解析(汎用有限 要素解析コード ABAQUS)の FEM 入力データ及び節 点応力データから直接,影響関数法により K 値計算及 び疲労き裂進展解析を可能とするソフトウェアを開発し た。これにより,表面き裂が進展する仮想き裂断面の応 力分布を多項式近似することなく,3D-FEM 解析結果 を直接利用してき裂進展解析が可能となった。
- (2) (1)で開発したソフトウェアシステムにより、回し 溶接部を有する試験片に生じた表面き裂の影響関数法に 基づいた疲労進展解析を行い、応力分布の標準化(応力 分布を直線近似)を行った場合のき裂進展解析結果と比 較し、より精度よく実験データを表現することがわかっ た。
- (3) 応力集中部から発生する表面き裂が進展する仮想き 裂断面の応力分布を把握するためには,本来,3次元の FEM 応力解析が必要であったが,その応力分布を推定 する2次元の応力解析から求まる応力集中係数に基づい た近似式を作成する方法を決定した。その方法により, 角回し溶接部から発生するき裂が進展する断面の近似式 を作成し,影響関数法に基づいた疲労き裂進展解析を行 った。その結果は,3D-FEM 解析結果を直接利用した 影響関数法き裂進展解析の結果とほぼ同じ結果が得られ ることをわかった。以上から,近似式によるき裂進展解 析の簡便化は有効である。

謝辞

本研究に対して,溶接学会疲労強度委員会委員長三木千 寿東京工業大学教授ならびに委員諸氏及び溶接学会 FTS 委員会委員長宮田隆司名古屋大学教授ならびに委員諸氏か ら有益な討論を賜った。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 日本溶接協会:WES 2805-1997 溶接継手の脆性破 壊発生及び疲労き裂進展に対する欠陥の評価方法, (1997).
- 2) ASME: Boiler and Pressure Vessel Code Section XI Appendix A, (1980).
- 3) BSI: PD 6493 Guidance on Some Methods for the

Derivation of Acceptance Levels for Defects in Fusion Welded Joints, (1980).

- (4) 矢川, 一宮, 安藤: 表面き裂からの熱衝撃破壊発生 に関する理論と実験(離散化誤差に基づく K 値解 析法の応用), 日本機械学会論文集(A 編), 45-395, (1979), 734-742.
- 白鳥, 三好, 谷川:任意分布力を受ける表面き裂の 応力拡大係数の解析, 日本機械学会論文集(A編), 51-467, (昭 60-7), 1828-1835.
- 白鳥,三好,谷川:任意分布力を受ける表面き裂の 応力拡大係数の解析(第2報,平板中の半だ円表面 き裂に対する影響係数の解析とその応用),日本機 械学会論文集(A編),52-474,(昭61-2),390-398.
- 7) 白鳥, 三好, 酒井, 張:任意分布力を受ける表面き裂
 の応力拡大係数の解析(第3報, 丸棒中の半だ円表)
- 面き裂に対する影響係数の解析とその応用),日本
 機械学会論文集(A編),53-488,(昭 62-4),779-785.

 的 白鳥,三好:任意分布力を受ける表面き裂の応力拡
- 6) ロ馬, 二対・日本57年/3 (データベースの作成と 大係数の解析 (影響係数 K_{ii} データベースの作成と その応用),日本材料学会第3回破壊力学シンポジ ウム講演論文集,(昭 60-6),82-86.
- 9) 白鳥, 酒井:影響関数法による表面き裂の応力拡大 係数の解析(円筒の表面き裂に対する影響係数の解 析とその応用), 日本材料学会第4回破壊力学シン ポジウム講演論文集,(昭 60-6), 125-129.
- 10) 吉田, 三好:表面き裂の強度評価システムの開発, 日本機械学会論文集 (A 編), 55-513, (1989-5), 1210 -1214.
- 11) 三好,吉田:構造物の表面き裂解析,機械の研究,43
 -1, (1991), 27-31.
- 12) 白鳥, 干, 寺門, 松本:影響関数法による3次元表面 き裂の評価システムの開発, 日本機械学会[No. 97-

44] 材料の強度と破壊に関するモデリング/シミュ レーション/マルチメディアシンポジウム講演論文 集, (1997-11), 9-12.

- 13) Shiratori, M., Miyoshi, T., Yu, Q., Terakado, T., Matsumoto, T.: Devolopment of a Software System Estimating Stress Intensity Factors and Fatigue Crack Propagation for Three-Dimensional Surface Cracks by an Influence Function Method, PVP-Vol. 385, Computer Technology-1999, ASME, (1999), 299-309.
- 14) 日本材料学会:金属材料疲労き裂進展抵抗データ 集, VOL.1, (1983).
- 15) Raju, I. S. and Newman, Jr., J. C.: Stress-Intensity Factors for a Wide Range of Semi-Elliptical Surface Cracks in Finite-Thickness Plates, Engineering Fracture Mechanics Vol. 11, Pergamon Press Ltd, (1979), 817-829.
- 16) 日本鋼構造協会編:鋼構造物の疲労設計指針・同解 説,技報堂出版,(1993).
- 17) SR 202: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,日本造船研究協会研究資料 No. 395 (1991).
- 18) 後川,中山: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,351-355.
- 19) 辻:非荷重伝達型隅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),241-251.
- 20) 小野塚,後川,熊倉,辻:溶接止端部形状が疲労強度 に及ぼす影響(第1報)-ビード止端の応力集中と 疲労寿命-,日本造船学会論文集,(1991),693-703.
- 21) Glinka, G., Calculation of Inelastic Notch-Tip Strain-Stress Histories under Cyclic Loading, Eng. Fract. Mech., Vol. 22, No. 5, (1985).