船殻局部構造の疲労破壊寿命についての試計算

正員 樋口 道之助* 正員 川 原 正 言**

正員 野 口 隆 男***

Fatigue Life Estimation of a Local Element in Ship Hull Structures

by Michinosuke Higuchi, *Member* Masanori Kawahara, *Member*
Takao Noguchi, *Member*

Summary

Fracture mechanics approaches have extensively been applied in the estimation of safety against fatigue fracture in ship hull structures. Fatigue failure often depends on the stress concentration, discontinuities in geometrical shapes and stiffness of local elements in the structure.

This paper presents a series of numerical calculation on fatigue crack growth around a man-hole in a double hull structure. Stress analyses were performed both by an ordinary finite element method and by a special one which used a substructure with a singular element in the crack tip region so as to calculate the stress intensity factors.

Crack growth was analyzed by using Paris' formula. The direction of crack growth was determined by σ_θ criterion. A simplified analysis was tried for the calculation of the stress intensity factor using a semi-infinite plate model and the numerical results of the ordinary finite element analysis without crack. The influence of the parameter m in Paris' formula to fatigue life was as well discussed.

1 緒 言

船殻構造における局部的損傷の防止対策に際しては、構造強度の検討段階において、その構造のもつ剛性の不連続性や構造の不連続部における応力集中などを十分考慮に入れ、構造物の疲労破壊または脆性破壊に対する安全性の評価を行なわなければならない。

特に構造物の疲労設計においては、疲労寿命の推定および検査期間の適切な設定などのために、その構造物の疲労亀裂の発生・伝播過程を明確にすることは重要である。

本研究はその第一段階として船殻局部構造にダブル・ハル構造部をとりあげ、線型破壊力学を適用してマン・ホールより生じる亀裂について、特異性をもつサブストラクチャーを用いた二次元有限要素法^{1),2)}で応力拡大係数を求め、疲労亀裂の伝播過程ならびに疲労寿命について考察した。さらに縁亀裂をもつ半無限板による解との比較検討を行ない、亀裂長さの近似推定範囲を求め疲労寿命の簡易推定法について論じた。

2 試計算対象構造物と外荷重条件

本研究でとりあつかう試計算対象構造物の寸法と材料特性を Fig.1 に、外荷重条件を Fig.2 に示す。

Case 1 は一様せん断力 F_S とこれに釣り合う面内曲げモーメント M_B が作用する場合であり、Case 2 は面内曲げモーメント M_B のみが作用する場合である。

3 亀裂の発生および伝播過程についての応力解析

数値計算は、平面応力問題としてあつかい Case 1 では $M_B=14.924(t \cdot m)$, $F_S=18.2(t)$, Case 2 では $M_B=5.52(t \cdot m)$ で行なった。なお使用した計算機は IBM 370/158 である。

3.1 亀裂発生個所の予測と亀裂伝播ゾーンの設定

亀裂なしの構造物の応力分布を通常の定ひずみ要素を用いた二次元有限要素法で解析する。その結果よりマン・ホールの縁の高応力集中部を求めそこに亀裂が発生すると考える。さらに亀裂は最大主応力に直角な方向へ伝播すると考えて、亀裂伝播経路の第一次予測を行ない亀裂伝播ゾーンを設定する。

Fig.3 と Fig.4 に各 Case の主応力および縁応力を

* 横浜国立大学工学部造船工学科

** 日本鋼管(株)技術研究所

*** 横浜国立大学大学院工学研究科

Fig. 1 Shape and dimensions of the model for the present analysis

Fig. 2 Loading conditions

Fig. 3 Principal stress diagram

Fig. 4 Principal stress diagram

示す。Case 2 についてはその対称性より右半分を解析した。これらの結果より亀裂は、Case 1 では $\theta_1 = 34^\circ$ 、Case 2 では $\theta_1 = 90^\circ$ のところに発生すると考えられる。Fig. 3 と Fig. 4 において斜線の内部が亀裂伝播ゾーンである。なお Case 2 においてはスキャロップ周りにも高応力集中がみられるが、ここでは計算の対象外とす

3.2 応力拡大係数の解析

本研究では、亀裂先端近傍に特異な応力・変位分布を有する要素を用いた Walsh⁸⁾ の理論を一般化した特異要素法に基づいて応力拡大係数を求める。

Fig. 5 に亀裂先端近傍の形状を示す。境界 Γ_0 の外側は構造物の大部分を占めるベースとなる通常要素の集合体であり、 Γ_0 の内側が通常要素と特異要素とからなる特異性をもつサブストラクチャーである。さらにサブストラクチャーの内部は亀裂先端を含む境界 Γ_1 (破線) の内側の特異要素と Γ_1 の外側の通常要素とから成っていて、 Γ_1 上の節点において変位が連続している。このようにしてサブストラクチャーを全体として 9 個の節点をもった 1 つの有限要素としてあつかい、解析を行なう。

亀裂の伝播方向は、亀裂は最大主応力に直交な方向へ伝播して行くという考え方に基づいて決定する。すなわち亀裂伝播方向 θ を応力拡大係数 K_I, K_{II} との次のような関係式によって求

める。

$$K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1) = 0 \quad (1)$$

Fig. 5 Substructure in the crack tip region

ン・ホールまわりの亀裂成長だけを取りあげた。

また亀裂は前節で得られた亀裂伝播ゾーン内を自動的に伝播させる。Fig. 5 に示すように点 1 にあった亀裂先端 (これを Step (1) における亀裂先端と呼ぶことにする) が θ の方向に進む場合、線分 lm との交点まで直線的に進むと仮定し交点 2、すなわち Step (2) において再び次の伝播方向を計算するという方法をとる。なお特異性をもつサブストラクチャーを用いた二次元有限要素法の詳細は参考文献 1), 2) を参照されたい。

以上の方法により求めた各 Case の応力拡大係数およ

Fig. 6 Relation between a and K_I, K_{II} Fig. 7 Relation between a and K_I

び伝播過程の応力解析結果を Fig. 6~11 に示す。

4 疲労亀裂伝播速度と疲労寿命

疲労1サイクルにおける応力拡大係数の変化幅 ΔK と亀裂の伝播速度 da/dN との間には Paris ら⁴⁾によって示された次の実験式がある。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2)$$

C, m : 材料定数

(2) 式において C と m は材料定数と考えられるパラメーターであり、北川ら^{5), 6)}は C と m との間に次式

$$C = \frac{A}{B^m} \quad (3)$$

で示すような相関関係があり、鋼材について $A \approx 0.5 \times 10^{-4}$, $B=55$ という値を求めている。

Fig. 8 Principal stress diagram

Fig. 9 Displacement diagram

Fig. 10 Principal stress diagram

Fig. 11 Displacement diagram

ΔK のレベルは、モーメント変動幅 ΔM_B を用いて $\Delta K = \Delta M_B \cdot f(a)$ (4)

のように亀裂長さ a のある関数 $f(a)$ とモーメント変動幅 ΔM_B との積として表わされるものと仮定すれば(4)式を(2)式に代入して繰り返し数 N を求めることができる。今、

$$\lambda = \int_0^{N_f} (\Delta M_B)^m dN = \frac{1}{C} \int_{a_0}^{a_f} \{f(a)\}^{-m} da \quad (5)$$

Fig. 12 Relation between a and N_{residual} Fig. 13 Relation between a and N_{residual}

a_0, a_f : それぞれ $N=0, N=N_f$ における亀裂長さとおき, ここでは簡単のために

$$(\Delta M_B)_{eq} = (\lambda/N)^{1/m} \quad (6)$$

で表わされる等価の一定変動幅のモーメント負荷条件のもとで計算を進めることとする。

Fig. 12 と Fig. 13 に各 Case について $m=4, 3, 2$ における残余の疲労寿命 N_{residual} を示す。なお Case 1 については, Fig. 6 の結果より K_{II} 値は K_I 値に比べて小さいので, ΔK の計算にあたっては K_I 値のみを用いた。

5 縁亀裂をもつ半無限板による解との比較

Stallybrass⁷⁾ は Fig. 14 に示すような半無限板の縁亀裂に沿って多項式で表わした直応力を作用させたときの, K_I 値の実用式を導いている。縁亀裂に沿う直応力

Fig. 14 Model of a semi-infinite plate with an edge crack

Table 1 Fatigue life for $a_0=10(\text{mm})$ (cycle)

Case		1	2
Method	m		
F. E. M. with Singular Element	4	2.893×10^4	1.127×10^8
	3	7.504×10^4	3.051×10^7
	2	2.067×10^5	1.057×10^7
Semi-infinite Approx.	4	4.171×10^4	3.676×10^7
	3	9.924×10^4	1.454×10^7
	2	2.501×10^5	7.404×10^6
ΔM_B		20(t-m)	20(t-m)
a_f		100(mm)	200(mm)

分布を次のような多項式

$$\sigma_N(x) = \sigma_0 \sum_{n=0}^{10} C_n \left(\frac{x}{a} \right)^n \quad (7)$$

で与えると, K_I 値は次式より求めることができる。

$$K_I = (1.1215 C_0 + 0.6829 C_1 + 0.5255 C_2 + 0.4410 C_3 + 0.3868 C_4 + \dots) \sigma_0 \sqrt{\pi a} \quad (8)$$

ここでは, (7), (8) 式を亀裂なしの通常の有限要素法による応力解析結果に適用して K_I 値の評価を試みた。なお計算は (8) 式の第 5 項目までをとって行なった。結果を各 Case ごとに Fig. 6 と Fig. 7 に一点鎖線で示す。

さらに得られた K_I 値をもとに疲労寿命を求めた。Table 1 は, 初期亀裂長さ $a_0=10(\text{mm})$ に対する疲労寿命のパラメーター m の変化による特異要素法との比較を示したものである。

m の影響は C, m の相関式としてどのようなものを用いるか, ΔK の平均的レベルがどの位か大きな影響を与える。 C, m の相関式として (3) 式を用いると安全側の推定結果が得られるのは, $\Delta K < B$ のときは m が小さ

い場合、 $\Delta K > B$ のときは m が大きい場合となる⁸⁾。従って、Table 1 に示されるような Case 1 と Case 2 との間の m の影響の差異は、それぞれの Case における ΔK のレベルと $B (=55 \text{ kg/mm}^{3/2})$ との大小関係で容易に説明される。

6 試計算結果の検討および考察

亀裂伝播過程の応力解析結果より通常の有限要素法による亀裂なしの応力解析で、亀裂伝播経路を十分予測することができる。

Case 1 では亀裂長さをマン・ホールの半径の 1/2 オーダーの範囲に、Case 2 ではマン・ホールの半径のオーダーの範囲にとると、縁亀裂をもつ半無限板による解法に基づく K_I 値は特異性をもつサブストラクチャーを用いた有限要素法によるそれと 20% 以下の誤差範囲にあり、亀裂伝播経路もマン・ホールの縁において法線方向にはほぼ直線的にのびている。

さらに、このような半無限板近似推定範囲の設定には亀裂前方にある拘束板との位置関係についての考慮も必要である。

なおこのような簡易解析を行なえる範囲で経過する寿命は、本研究で求めた亀裂成長経路全範囲での寿命のおよそ 70~80% 以上を占めている。

以上のことを考え合わせると、亀裂なしの応力解析および縁亀裂をもつ半無限板の応力拡大係数の解を併用する簡易解析法により、多くの船殻局部構造の疲労寿命を近似的に求めることができるとと思われる。

本来、この種の解析には構造物を三次元立体構造としてとりあつかうことが必要であり、特にスキヤロップから生じる亀裂や亀裂が拘束板に接近した場合の挙動など、不明な点も多く、今後は実験を考慮し別の面からのアプローチが必要かと思われる。

7 結 言

船殻局部構造の疲労破壊寿命についての試計算を行なう次の結論を得た。

(1) 通常の有限要素法による亀裂なしの応力解析

で、亀裂の発生・伝播の第一次予測が行なえる。

(2) 特異性をもつサブストラクチャーを用いた有限要素法で応力拡大係数を求め、この結果より残余の疲労寿命を求めた。

(3) 亀裂なしの応力解析および縁亀裂をもつ半無限板の応力拡大係数の解を併用した簡易解析法の有効性を確認し、その有効性を満足する亀裂長さの近似推定範囲を求めた。

(4) 今後の問題点としては、スキヤロップから生じる亀裂や亀裂が拘束板に接近した場合の挙動の解析が必要である。

本研究は、日本造船研究協会第 169 研究部会による研究の一部として実施されたものであり、種々御討論、御指導を賜りました同部会長 金沢武教授をはじめ委員の方々には深く感謝するしだいである。

参 考 文 献

- 1) 樋口, 川原, 近藤: 特異性を含むサブストラクチャーによる応力拡大係数の解析, 日本造船学会論文集, 第 135 号 (1974), pp. 327~335.
- 2) 樋口, 川原, 近藤, 栗原: 2 次元亀裂の進展シミュレーション, 日本造船学会論文集, 第 139 号 (1976), pp. 233~238.
- 3) P. F. Walsh: The Computation of Stress Intensity Factors by a Special Finite Element Technique, Int. J. Solids Structures, Vol. 17 (1971), pp. 1333~1342.
- 4) P. C. Paris, F. Erdogan: A Critical Analysis of Crack Propagation Law, Trans. ASME, Ser. D, Vol. 85 (1963), p. 528.
- 5) 北川, 三角: 機械学会講演論文集, 714-10 (昭 46), p. 67.
- 6) 北川: 機械学会誌, Vol. 75 (昭 47), p. 1068, および三角: 東京大学学位論文 (昭 47).
- 7) M. P. Stallybrass: Int. J. Engr. Sci., 8 (1970), p. 351.
- 8) 越賀, 川原: 疲労亀裂伝播に着目した設計基準に関する二, 三の考察, 日本造船学会論文集, 第 133 号 (1973), pp. 249~256.