予ひずみ材の延性き裂伝播評価法

正員 上 田 幸 雄* 正員 村 川 英 一*
正員 谷 川 雅 之**

An Evaluation Method for Ductile Crack Propagation in Pre-strained Plates

by Yukio Ueda, *Member*, Hidekazu Murakawa, *Member*
Masayuki Tanigawa, *Member*

Summary

In crack propagation analyses of ship side outer platings subjected to collision load, effect of pre-strain on crack propagation behavior should be clarified because not a few plastic deformation is usually generated on outer platings before crack initiation. And crack propagation simulation methods using a coarse mesh FEM model would be required in ship collision analysis owing to a huge numerical simulation model.

In this paper, pre-strain effect on crack propagation behavior was investigated with tensile tests of center notched plates whose pre-strains were 0.0, 0.15 and 0.3. In the experiment crack tip opening angles measured from grid line deformation drawn on the specimens were obtained for each pre-strain level and were verified to be a useful parameter for crack propagation simulation by performing FEM analyses of the experiment. Then a practical FEM simulation method for crack propagation, which includes the finite element size effect, was proposed.

1. 緒 言

衝突荷重を受ける船側構造が吸収できるエネルギーを評価する場合、船側外板等が塑性変形した後の延性き裂発生評価が重要となる。また、ダブルハル構造の場合、外板にき裂が発生した後の吸収エネルギーを評価するためには、延性き裂の伝播を考える必要がある。従来の衝突強度評価ではき裂発生条件として材料の破断ひずみを経験的に小さくした値を用いているが、構造的な不連続によるひずみ集中等とき裂発生との関係が不明確であり、船側構造のき裂伝播については評価を行った例はみられない。前報¹⁾では、き裂の発生を、構造的な不連続や応力状態の多軸性の影響を含めて延性損傷パラメータにより評価する方法を示した。本論文ではき裂伝播を評価する方法について検討を行う。

船側構造は衝突船首の突入により陥没し、引延ばされた状態でき裂が発生することから、き裂が伝播する領域は塑性変形を予ひずみとして受けることになる。予ひずみがき裂伝播挙動に及ぼす影響を取り上げた研究はみられないが、矢尾らが行った切欠きを有する円管の曲げによるき裂伝播実験によると、引抜き加工により予ひずみが与えられた試験体のき裂伝播に対する抵抗力が小さくなることから²⁾、予ひずみがき裂伝播条件に及ぼす影響を明らかにすることが必要である。また、船舶の衝突解析は一般に大規模な数値計算となることから、有限要素の分割が粗いモデルを用いて、き裂の伝播挙動を解析する方法を開発する必要がある。本論文では、予ひずみ材のき裂伝播実験とFEMによるシミュレーション解析を行い、き裂伝播特性を表わす破壊力学パラメータとしてその有効性が確認されているき裂先端開口角^{3),4)}を考え、予ひずみがき裂伝播条件に及ぼす影響を調べた。さらに、実用的なき裂伝播解析の方法を開発するため、有限要素のサイズがき裂先端開口角の限界値に及ぼす影響を調べるとともに、き裂先端開口角の限界値と有限要素の破壊ひずみとの関係について検討を行った。これらの結果について報告する。

* 大阪大学溶接工学研究所

** 日立造船機技術研究所 構造・流体技術研究センター

2. 予ひずみ材の延性き裂伝播実験

予ひずみがき裂伝播挙動に及ぼす影響を調べるため、予め塑性変形を与えた試験体に切欠きを加工してき裂伝播実験を行い、予ひずみを与えない試験体の実験結果と比較した。

2.1 試験体

試験体は、Fig. 1 に示す形状で、厚さ 4.5 mm の SS 400 製の板材である。幅 200 mm の試験体中央部には、スリット状の切欠きを設けた。切欠きの寸法は、長さ 20 mm、幅 2 mm、先端部アールを 1 mm とした。また、試験体中央部にはき裂周辺の変形を計測するため Fig. 2 に示すように、4 mm 間隔で格子状のけがき線をひいた。

2.2 実験の方法

実験は 300 tonf のアムスラー型引張り試験機で実施した。予ひずみを与えた試験体は、切欠きがない状態で所定のひずみが生じるまで引張り変形を与えた後、切欠きを加工し、き裂伝播実験を行った。予ひずみは試験体中央部に取り付けた標点間長さ 50 mm の伸び計によって計測した。実験は Table 1 に示すように、予ひずみ 0.0 mm/mm (SE-2)、0.15 mm/mm (SE-3) および 0.30 mm/mm (SE-4) の試験体について実施した。なお、参考のため切欠きを加工しない試験体 (SE-1) の引張破壊実験もあわせて実

施した。

計測は、荷重、荷重点変位について行った他、格子状のけがき線の変形を写真撮影により記録した。

2.3 実験の結果

(1) き裂の伝播状況

き裂の伝播状況を、SE-2、SE-3、SE-4 についてそれぞれ、Photo. 1, Photo. 2, Photo. 3 に示す。

予ひずみのない SE-2 では、切欠き部が大きく変形し、中央部の開口変位が 4 mm 程度になった時点でき裂が発生した。その後き裂はほぼ一定の開口角を保ちながら荷重と

Table 1 Test specimens

Specimen No.	Prestrain	Shape
SE-1	0.0 mm/mm	Flat
SE-2	0.0 mm/mm	Notch
SE-3	0.15 mm/mm	Notch
SE-4	0.30 mm/mm	Notch

Photo. 1 Crack propagation (SE-2: Pre-strain=0.0)

Photo. 2 Crack propagation (SE-3: Pre-strain=0.15)

Photo. 3 Crack propagation (SE-4: Pre-strain=0.30)

Fig. 1 Crack propagation test specimen (SE)

Fig. 2 Grid line drawn around notch

直角の方向に伝播し、破断に至った。予ひずみを 0.15 mm/mm 与えた SE-3 では、切欠き部の変形が小さい段階でき裂が発生した。き裂の開口角をみると予ひずみのない SE-2 より小さくなっていることがわかる。また、予ひずみを 0.30 mm/mm 与えた SE-4 では、切欠き部の変形がほとんどない状態でき裂が発生し、き裂の開口角もかなり小さくなっていることがわかる。

(2) 荷重と荷重点変位の関係

荷重と荷重点変位の関係を Fig. 3 に示す。全般的な傾向として、マクロ的なき裂の発生とともに荷重の低下が始まり、き裂の安定的な伝播を経た後、き裂伝播の不安定化により、荷重が急激に低下して破断する特徴を示した。SE-2 および SE-3 で除荷と再負荷があるのは、途中で試験体を取り外し切欠きを加工したためである。

次に予ひずみの影響をみる。予ひずみを与えない SE-1 では初期の荷重の低下は鈍いが、その後はほぼ一定の勾配で低下を続け、破断するまで安定なき裂伝播がみられた。予ひずみを 0.15 mm/mm 与えた SE-3 では、荷重の低下の鈍い期間がしばらく続いた後、荷重の低下が開始した。なお、途中で曲線の勾配が変化したのはき裂の方向が荷重に対し直角な方向から 45° の方向へ変化したことによる。予ひずみを 0.30 mm/mm 与えた SE-4 では、初期から荷重は急激に低下した。途中で曲線の勾配が緩くなったのは片側のき裂が貫通し、中央き裂から片側き裂の変形モードに変わったことによる。また、切欠きのない SE-1 との差が小さいことから材料の変形能力の限界近くに達していたと考えられる。

Fig. 3 Load-displacement curve

Fig. 4 Definition of crack tip opening angle CTOA'

(3) き裂先端開口角

き裂先端開口角 (CTOA) の正確な計測は困難であるため、き裂先端から一定距離離れた位置における開口角を考える。本論文では、Fig. 4 に示すように、き裂伝播ラインからそれぞれ 4 mm の位置にある 2 本のけがき線のき裂先端位置における開口角を CTOA' と定義した。

計測した CTOA' とき裂長さの $1/2$ との関係を、SE-2, SE-3 および SE-4 について Fig. 5 に示す。図には計測結果とともに平均的な値も示した。SE-2 で初期に高い値が見られるのは全体の塑性ひずみが小さいため材料の加工硬化が大きく、き裂伝播に抵抗したためと考えられる。き裂伝播時における CTOA' の平均的な値と予ひずみの関係を Fig. 6 にまとめた。図より予ひずみが 0.15 mm/mm 程度の場合、CTOA' の低下は小さいが、予ひずみが 0.30 mm/mm 近くになると大幅に低下することがわかる。

3. き裂伝播シミュレーション解析の方法

シミュレーション解析に用いるき裂伝播条件は、き裂伝播実験に対するシミュレーション解析において、荷重と荷重点変位の関係等を合わせることで伝播条件を推定する逆解析手法 (Generation phase 解析) により定められることが多い。しかし、逆解析により推定された値は、モデル化や数値計算上の誤差を含むため材料特性値としては問

Fig. 5 Relation between crack tip opening angle CTOA' and half crack length

Fig. 6 Relation between CTOA' and pre-strain

題がある。ここでは、き裂伝播条件として計測された開口角そのものを用いて試験体のき裂伝播シミュレーション解析を行い、荷重-荷重点変位関係を比較して解析法の有効性を確認した。

3.1 き裂伝播シミュレーション解析に用いるき裂伝播条件

き裂伝播シミュレーション解析を行う方法としては、Andersonによって始められた節点解放法⁵⁾があるが、船舶の衝突のような大規模な解析では有限要素を破壊させる方法が効率的である。ここでは、要素を破壊させることによりき裂伝播シミュレーション解析を行う方法を考える。

FEM解析では破壊した有限要素を消去することによってき裂の形状が表されるため、き裂先端の形状は矩形となり実際のき裂形状とは異なる。そこで、き裂形状が開口角に及ぼす影響を調べるため、FEM解析モデルより得られる開口角を理論解と比較した。Fig. 7に比較したモデルを示す。FEM解析モデルは中央にき裂がある1,000 mm×1,000 mmの正方形の板で、要素のサイズは4 mm×4 mmとした。荷重辺に作用する応力は100 MPaで弾性、平面応力状態を考えた。縦弾性係数 E は205,800 MPa、ポアソン比 ν は0.3とした。理論解のモデルとしては、一様引張り荷重を受ける無限板中のき裂を考えた。き裂先端から距離 r 、き裂中心線方向から角度 θ の位置における荷重方向の変位 V は次式で表される。

$$V = \frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left(\kappa + 1 - 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad (1)$$

ここで、 $K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$ 、 $\kappa = (3 - \nu)/(1 + \nu)$ 、 $G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$ である。また、 σ は無限遠方での応力、 a はき裂長さである。

き裂長さが80 mmの場合について、き裂中心線から4 mmの位置 ($Y=4$ mm) におけるき裂先端付近の変位分布の比較を Fig. 8 に示す。参考のため理論解についてはき裂中心線上 ($Y=0$ mm) での変位の分布も示した。また、Fig. 9には開口角の定義を示す。開口角におけるFEM解析と理論解の比較を、き裂長さが16 mm, 32 mm, 89 mm, および200 mmの場合についてまとめたものを Fig. 10 に示す。図より、FEM解析により計算される開口角は理論解析で得られる値よりも小さくなるが、両者の比率は、き裂長さが変化してもほぼ一定値、約0.78に保たれることがわかる。

き裂伝播解析では、Fig. 9に示すようにき裂先端に位置する要素について節点変位から開口角を計算し、開口角が限界値 (CTOA') を超えた場合に要素が破壊したとみなして消去する。なお、解析で用いる CTOA' の値は解析モデルと実際のき裂の形状の違いを考慮し、計測値の0.78倍とした。Table 2に各予びずみに対するCTOA'の計測値とFEM解析で用いた値を示す。

3.2 試験体のき裂伝播シミュレーション解析

(1) 解析モデル

Fig. 7 Crack analysis model

Fig. 9 Definition of CTOA' in crack analysis model

Fig. 8 Comparison of displacement around crack tip between theory and FEM

Fig. 10 Comparison of CTOA' between FEM and theory in elastic analysis of center notch plate

試験体の解析モデルについて説明する。Fig. 11 に要素分割図と荷重および境界条件を示す。解析モデルは対称性より 1/4 の部分を考えた。要素サイズは板厚と同等の 4 mm×4 mm を基本とし、2 次元平面応力要素を使用した。材料定数は、縦弾性係数：20,5800 MPa、ポアソン比：0.3、降伏応力：333.0 MPa とし、加工硬化特性は、Table 3 に示すように実験で用いた材料の塑性域における真応力と真ひずみ（対数ひずみ）の関係を指数則で近似して与えた。解析プログラムは、DYTRAN を使用した。

(2) 解析結果

SE-2 の変形図の例を Fig. 12 に示す。Photo. 1 と比較してわかるように、き裂が開口しながら伝播する様子が良好にシミュレートされていることがわかる。

Table 2 Crack tip opening angle obtained from experiment and adjusted for FEM model

Pre-strain (mm/mm)	CTOA' (rad.)	
	Experiment	FEM
0.0	0.114	0.089
0.15	0.087	0.068
0.30	0.031	0.024

Table 3 Properties for approximated stress-strain curve

Yield stress : σ_y (True stress : MPa)	Strain hardening coefficient	
	$\sigma_{true} = C \epsilon_{true}^n$	
	n	C
333.0	0.2	692.3

Fig. 11 Finite element model of crack propagation specimen

Fig. 12 Crack propagation analysis result for specimen SE-2

次に、き裂伝播長さと荷重点変位の関係を見る。ここで、き裂伝播長さは左右両側のき裂長さとし、初期の切欠きの長さは含まない。試験体 SE-2, SE-3, SE-4 についてき裂伝播長さ－荷重点変位関係における解析結果と実験値との比較を、それぞれ Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15 に示す。図で SE-3 においてき裂の方向が変化した後の実験結果、および SE-4 において片側のき裂が貫通した後の実験結果は除いている。SE-2 では、初期においてき裂が伝播しにくい領域を除くとき裂伝播長さと荷重点変位の関係の勾配はよく一致していることがわかる。また、SE-3, SE-4 についてもき

Fig. 13 Relation between crack length and load point displacement in SE-2

Fig. 14 Relation between crack length and load point displacement in SE-3

Fig. 15 Relation between crack length and load point displacement in SE-4

裂が定常的に伝播する領域では、シミュレーション解析の結果はき裂伝播長さ-荷重点変位曲線の勾配を概ね推定できることがわかる。これらの結果から、き裂先端開口角(CTOA')を用いたき裂伝播シミュレーション解析法は有効であると考えられる。

4. 実船衝突解析への適用方法

実船の衝突解析を行う場合、要素サイズは、一般に板厚の10倍のオーダーとなるため、要素サイズに応じてき裂伝播条件を補正する必要がある。また、CTOA'を用いる方法は開口角を算出するための節点の選出等に時間がかかるため、大規模な解析ではより効率的な方法を考える必要がある。

ここでは、き裂伝播条件としてCTOA'を用いた板厚程度の細かい要素サイズのモデルによる解析結果をもとに、要素サイズによるき裂伝播条件の補正方法を検討する。また、き裂伝播条件として容易に算出できる相当塑性ひずみ限界値の有効性を調べる。

4.1 解析モデル

解析モデルは、1軸引張り荷重を受ける中央切欠き平板で、寸法は1000 mm×1000 mm、板厚は5 mmとし、対称性より全体の1/4の部分考えた。要素サイズは、板厚の0.8倍、2倍、5倍および10倍の4つのモデル考えた。材料特性等は、試験体の解析で用いたものと同じ値を使用した。

4.2 有限要素サイズがき裂伝播条件に及ぼす影響

要素のサイズが大きくなると、Fig. 16に示すように開口角を算出するための2節点間の距離が長くなるとともに、矩形でモデル化されたき裂形状が変化する。

はじめに、要素サイズと開口角の関係を弾性状態について調べる。要素サイズが0.8 t (4 mm)、10 t (50 mm)のモデルを考え、それぞれをFine mesh model, Coarse mesh modelと呼ぶことにする。Fine mesh modelに対する開口角を α_f 、Coarse mesh modelに対する開口角を α_c とし、それぞれ、Fig. 16中の節点a-b間および節点A-B間の変位差から算出される。解析ではき裂がない部分の平均応力を100 MPaとし、弾性解析を行った。Fig. 17に、開口角と

き裂半長との関係を示す。Fine mesh modelで算出される α_f は、Coarse mesh modelで算出される α_c の約3倍となった。また、 α_c の算出に用いた節点位置に対応するFine mesh modelの節点c-dから算出した開口角 β_f の値をFig. 17中に示す。 α_c は β_f よりやや大きい³⁾、近い値になっていることがわかる。

次に弾塑性状態について考える。実験で求めたCTOA'に補正係数0.78を乗じた値をき裂伝播条件として用い、予ひずみが0.0 mm/mm、0.15 mm/mmおよび0.30 mm/mmの場合に対してFine mesh modelによるき裂伝播シミュレーション解析を行い、開口角 α_f と β_f の比較を行った。結果をTable 4に示す。表より弾塑性状態では α_f と β_f の差が弾性状態に比較してはるかに小さくなること、その傾向は予ひずみが大きくなるほど強くなる³⁾ことがわかる。

以上の結果より、弾性状態において α_c は α_f と β_f の間にあり β_f に近い値をとること、弾塑性状態では α_f と β_f の差が小さくなることから、 α_c と β_f はほぼ等しくなると考えられる。従って、Coarse mesh modelのき裂伝播条件としてFine mesh modelのき裂伝播解析で得られた β_f の値を用いることとした。この方法により要素サイズを変えて解析したき裂長さ³⁾と荷重点変位の関係を、予ひずみが0.0 mm/mmの場合についてFig. 18に示す。また、要素サイズsが板厚tの0.8倍及び5倍の場合の変形図をFig. 19に示す。初期を除いて曲線の勾配は良く一致しており、上記の考え方は要素サイズに対してき裂伝播条件を補正する

Fig. 17 Effect of mesh size on CTOA'

Fig. 16 Grid points for CTOA' calculation

Table 4 Crack tip opening angle CTOA' obtained from fine mesh model whose mesh size is 0.8 t

Unit : radian

Base length for CTOA' evaluation	Pre-strain 0.0mm/mm	Pre-strain 0.15mm/mm	Pre-strain 0.30mm/mm
0.8t(α_f)	0.089	0.068	0.024
2.0t(β_f)	0.084	0.068	0.024
5.0t(β_f)	0.081	0.068	0.024
10.0t(β_f)	0.076	0.065	0.024

Fig. 18 Relation between crack length and load point displacement in various mesh size models

Fig. 20 Relation between failure strain and half crack length

Fig. 19 Effect of mesh size on crack propagation behavior

Fig. 21 Critical value of equivalent plastic strain at the crack tip element varying with mesh size

方法として有効であることがわかる。

4.3 き裂先端要素の破壊限界予ひずみ

実船構造の解析ではモデルが大規模となることから、き裂伝播条件として算出がやや煩雑となる開口角よりも算出が容易な要素の破壊予ひずみを用いることが効率的である。

4.2の解析で得られたき裂先端要素が破壊したときの相当塑性予ひずみとき裂半長との関係を予ひずみが0.0 mm/mmの場合について Fig. 20 に示す。図より前半と最後を除くとき裂伝播に対する相当塑性予ひずみの限界値はほぼ一定となることから、充分長いき裂に対してはき裂伝播条件として用いることが可能と考えられる。き裂伝播に対する相当塑性予ひずみ限界値と要素サイズの影響を Fig. 21 にまとめて示した。ここで、図の限界値は予ひずみを含んだ値である。予ひずみが大きくなると要素サイズの影響を受けにくくなるがわかる。

5. 結 言

衝突荷重を受ける船側外板がき裂発生までに受けた塑性変形のき裂伝播挙動に及ぼす影響を調べるため、予ひずみを与えた試験体によるき裂伝播実験と FEM によるシミュレーション解析を行い、き裂伝播条件に対する予ひずみの影響を調べるとともに、実用的なシミュレーション解析方法の検討を行った。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 予ひずみを与えた中央切欠き試験体によるき裂伝播実験を行い、予ひずみによりき裂が伝播しやすくなる現象を確認するとともに、き裂伝播時の開口角 CTOA' の計測データを取得した。
- (2) 実用的なき裂伝播シミュレーション解析法として、計測で求めた CTOA' に、FEM 解析モデルと実際のき裂の形状の違いを考慮して補正した開口角の限界値を用いる方法を示し、その有効性を確認した。
- (3) き裂伝播条件に対する要素サイズの影響を調べるため、中央に切欠きを有し一様引張り荷重を受ける平板について、CTOA' をき裂伝播条件としたシミュレーション解析を行い、要素サイズにより CTOA' を修正する方法を示した。
- (4) き裂伝播条件として、容易に算出できる相当塑性予ひずみを用いる方法の可能性を示し、要素サイズと相当塑性予ひずみ限界値の関係を求めた。

謝 辞

研究を進めるにあたり広島大学の矢尾哲也教授には有益なご助言をいただきました。実験を進めるにあたり大阪大学溶接工学研究所の古木良一技官、麻寧緒助手ならびに上田研究室の皆様には多大なご協力をいただきました。また、

解析を進めるにあたり日本エムエスシー(株)のシェリーフ
ラシッド氏のご協力をいただきました。ここに謹んでお礼
を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 上田幸雄, 村川英一, 谷川雅之, 米田尚弘, 岩田節雄,
後藤浩二: 衝突時における船体構造不連続部の延性
破壊評価法に関する研究, 日本造船学会論文集, 第
177号 (1995), pp. 371-380
- 2) 矢尾哲也, 藤久保昌彦, 趙 耀: き裂損傷を有する
円筒部材の曲げ耐荷力に関する研究, 日本造船学会
論文集, 第166号 (1989), pp. 295-302
- 3) 金沢 武, 町田 進, 栗山幸久, 栗飯原周二, 稲見彰
則: 安定き裂成長後の不安定破壊発生挙動について
(第二報), 日本造船学会論文集, 第148号 (1980), pp.
193-202
- 4) 小笠原昌雄, 岡村弘之: 平面応力延性き裂の進展時
のき裂先端開口角 (CTOA) について, 日本造船学会
論文集, 第151号 (1982), pp. 238-244
- 5) Anderson, H., A.: Finite-Element Representa-
tion of Stable Crack - Growth, Journal of
Mechanics and Physics of Solids, Vol. 21 (1973)