

I-64 有限要素法による疲労き裂進展解析システムの開発

三井造船（株） 正会員 曾我 明
岡山大学工学部 正会員 谷口 健男

1. まえがき 供用中の鋼橋において、疲労によるき裂の発生がしばしば報告されるようになってきた。そのため、最近では線形破壊力学の発達にともなってこれらの安全性を検討する余寿命予測の解析が頻繁に行われるようになったが、この解析にはかなりの時間と手間を要し、簡単には進展挙動をとらえられないのが通常である。そこで本研究では、これらの障害を排除するため、き裂進展解析を自動化することによって簡単に余寿命予測が行なえる、有限要素法（FEM）による疲労き裂進展解析プログラムの開発を行った。

2. システムの概要 本システムの構成を、Fig.1 に示す。バッチ型処理の各部分は、コントロール・データによって独立に実行することも可能となっている。

3. 疲労き裂進展解析

3.1 解析のフローチャート 解析のフローをFig.2 に示す。本システムでは初期の基本データ（形状、外力、境界条件、材料データ等）のみを入力すれば、き裂の進展ステップごとに弾性解析が自動的に行われ、各ステップごとの応力拡大係数（K値）、き裂進展方向、進展寿命が得られるようになっている。そのため従来までのような進展ごとのデータ作成の煩わしさがなく、極めて簡単に進展解析ができる。

3.2 基礎理論、及び解析法

3.2.1 自動要素分割法 本システムでは、各段階で求められたき裂進展方向ならびに進展量をもとに、有限要素は自動的に再分割され、入力データも自動修正される方式となっている。

3.2.2 節点番号付け 演算容量、演算時間をより小さくするために、再節点番号付けとして、GPS法を用いてプロファイル領域（実演算領域）の最適化を行っている。

3.2.3 応力拡大数（K値）の算定 き裂先端部では高精度の解を得るために、2次の3辺形アイソパラメトリック特異要素を用いている。K値算定としては、①Ingraffeaの変位法、②J積分法の2手法を用意している。K値の精度としてはTable.1 に示すように、ほぼ理論解に近い精度の解が2手法とも得られており、実用上満足できる結果となっている。

3.2.4 き裂進展方向の算定 混合モード下におけるき裂進展方向の予測に関しては、①主応力最大の方向、②ひずみエネルギー密度最小の方向の2手法を用意している。

3.2.5 疲労き裂の進展則 き裂の進展速度 da/dN は、Table.2 に示す7種類の中からユーザーが任意に選択できるようになっている。材料定数 c, m が不明な場合は、降伏応力 σ のみ入力すれば $Haddox$ の c, m, σ の関係式より設定される。また、 ΔK_{th} についても、不明な場合は $da/dN=10^{-8}$ となるような ΔK_{th} をとらすことができる。なお、寿命計算についてはき裂進展速度式を用いて差分的に求めている。

3.2.6 荷重（応力）頻度 荷重（応力）頻度は、①任意ブロック型と②確率密度分布（指数分布、レイリー分布、ワイブル分布）型の2種類を扱うことができる。

4. 解析例

4.1 中央直き裂を有する試験片 Fig.4(a)に示すような中央に直き裂を有する試験片について、疲労き裂の進展解析を行い実験値と比較した。解析条件をTable.3(a)に、解析結果をFig.5 に示す。進展方向、進展寿命とも実験結果とほぼ一致している。

4.2 片側斜めき裂を有する試験片 Fig.4(b)に示す軸方向と45°をなす片側斜めき裂を有する試験片について、疲労き裂の進展解析を行った。解析条件をTable.3(b)に、進展経路の解析結果及び実験結果をFig.6 に示す。実験値と同様、初期の斜めき裂から急速に引張り型にき裂が進展しており、良く一致しているのがわかる。Fig.7 に進展寿命とき裂長の関係を示す。実験結果の外力が定かでないため直接比較はできないが、上記設定応力下でき裂が約50mm進展する

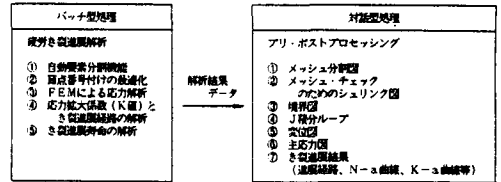


Fig.1 システムの構成

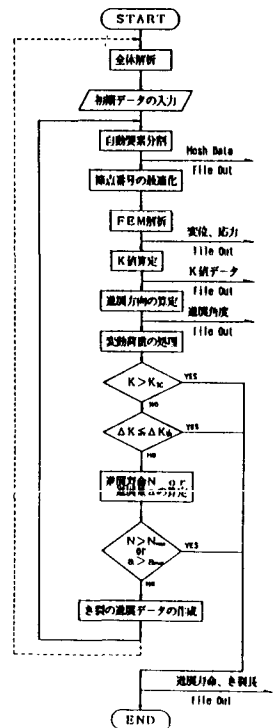


Fig.2 解析のフローチャート

のに 3.626×10^5 回の繰返し数がかかることがわかる。

5. あとがき 本システムの開発により、き裂進展解析が従来手法と比べて、極めて効率的、かつ精度良く行なえるようになった。

- 参考文献>1) Gibbs, N.E., Poole, W.G. and Stockmeyer, P.K. An algorithm for reducing the bandwidth and profile of a sparse matrix, SIAM J. Num. Anal., 13, pp236-250, 1976
 2) Boshdy S. Barsoum, On the use of Isoparametric Finite Elements in Linear Fracture Mechanics, International Journal Methods in Engineering, Vol. 10, pp25-37, 1976
 3) A.R. Ingraffea, Numerical modeling of fracture propagation, Rock Fracture Mechanics (ed. H.P. Rossmaith), Springer Verlag, pp. 151-208, 1983
 4) J.R. Rice, A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notes and Cracks, Journal of Applied Mechanics, pp379-386, 1968, 7
 5) F. Erdogan and G.C. Sih, On the Crack Extension in Plates Under Plane Loading and Transverse Shear, Journal of Basic Engineering, pp519-527, 1963, 12
 6) G.C. Sih, Introductory chapter: A special theory of crack propagation, Mechanics of Fracture, Vol. 1, Noordhoff, pp21-45, 1972
 7) 金澤 武、飯田潤海共著、溶接継手の強度、産報出版
 8) 中沢 一、小林英男 他、大形鋼板の破れき裂進展挙動の破壊力学ならびにフラクトグラフィの検討
 9) 尾野 英夫、仁瀬 寛太、杉本 幸治、疲裂き裂進展解析システム“KASPAC” (Kawasaki System on Propagation Analysis of Crack)の開発、川崎重工技術89号, pp1-9, 1985, 7

Table.1 K値の精度

(a) 片側き裂		0.1	0.3	0.5	0.7
J積分 (K_{II}/K_I)	変位法 (K_{II}/K_I)	8.05 (99.38)	16.97 (100.05)	25.23 (99.43)	32.43 (98.05)
	J積分 (K_{II}/K_I)	8.72 (100.35)	16.31 (101.58)	25.04 (101.25)	32.36 (100.98)
理論値 - K_{II}		8.70	16.87	25.04	32.55

(b) 中央き裂		0.1	0.3	0.5	0.7
J積分 (K_{II}/K_I)	変位法 (K_{II}/K_I)	8.05 (100.25)	16.97 (100.05)	14.87 (100.06)	22.05 (100.05)
	J積分 (K_{II}/K_I)	8.08 (100.73)	16.40 (101.38)	15.08 (101.43)	22.38 (101.43)
理論値 - K_{II}		8.04	16.27	14.87	22.06

(c) 3点曲げ試験		0.1	0.3	0.5	0.7
J積分 (K_{II}/K_I)	変位法 (K_{II}/K_I)	8.05 (98.08)	16.99 (99.35)	31.57 (99.15)	69.40 (102.05)
	J積分 (K_{II}/K_I)	8.99 (100.43)	18.41 (101.95)	32.15 (101.95)	70.98 (105.25)
理論値 - K_{II}		9.95	18.22	31.82	67.48

Table.2 き裂進展速度の評価式

Paris	$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m$
tail	$\frac{da}{dN} = \frac{C}{1-R} (\Delta K)^m$
Klensil&Lukas	$\frac{da}{dN} = C (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m)$
Forman	$\frac{da}{dN} = \frac{C (\Delta K)^m}{(1-R) K_c - \Delta K_{th}}$
Schulz	$\frac{da}{dN} = \frac{C (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m)}{(1-R) K_c - \Delta K_{th}}$
Walker	$\frac{da}{dN} = C (K_{max} (1-R))^m$
Libor	$\frac{da}{dN} = C [(0.510 - 4R) \Delta K]^m$

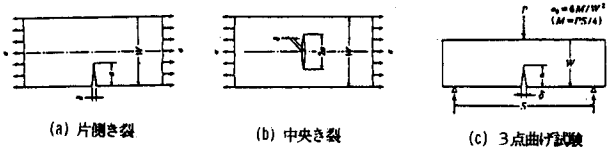


Fig.3 モデル 1

Table.3 解析条件

(a) 中央き裂を有する試験片		(b) 片側斜めき裂を有する試験片	
材質	自物中構造用鋼線引鋼板(S45C)	材質	JIS50K鋼
材料定数	$E: 21000 \text{ kgf/mm}^2$, $\nu: 0.3$ $C: 6.8 \times 10^{-11}$, $m: 3.35$	材料定数	$E: 21000 \text{ kgf/mm}^2$, $\nu: 0.3$ $C: 1.29 \times 10^{-11}$, $m: 3.86$
荷重条件	一定幅荷重 $\Delta \sigma: 16.75 \text{ kgf/mm}^2$ ($\sigma: 0.75 \sim 17.5 \text{ kgf/mm}^2$)	荷重条件	一定幅荷重 $\Delta \sigma: 6.3 \text{ kgf/mm}^2$ ($\sigma: 0.0 \sim 6.3 \text{ kgf/mm}^2$)
初期き裂長	$a: 7 \text{ mm}$	初期き裂長	$a: 10/2 \text{ mm}$
最終き裂長	$a: 57 \text{ mm}$	最終き裂長	$a: 50 \text{ mm}$
K値算定	J積分法	K値算定	Ingraffeaの実用式
進展則	Paris I 則	進展則	Paris I 則
進展方向	主応力の最大方向	進展方向	主応力の最大方向

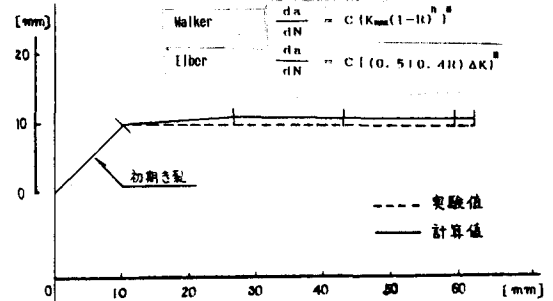


Fig.6 疲労き裂進展経路 (片側斜めき裂)

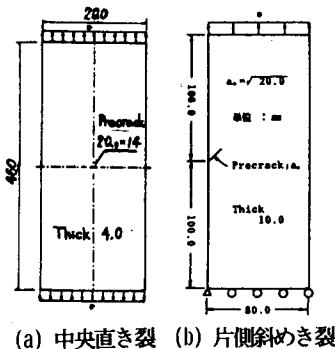


Fig.4 モデル2

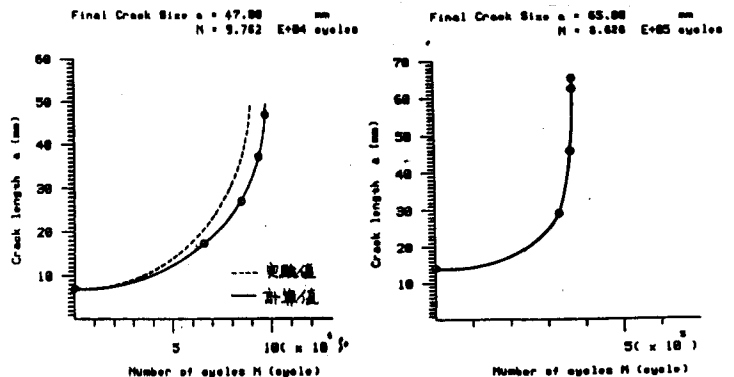


Fig.5 疲労き裂進展寿命 (中央直き裂)

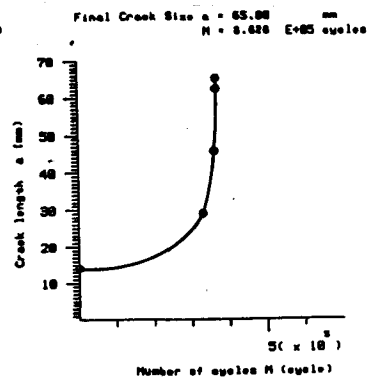


Fig.7 疲労き裂進展寿命 (片側斜めき裂)