

# 板厚貫通切欠材の疲労亀裂進展解析への有限要素法の適用性について

（株）宮地鐵工所 学生会員 ○市毛 滋之  
 京都大学 正会員 宇都宮智昭

## 1. はじめに

破壊力学に立脚した有限要素法により、疲労亀裂の進展ならびに破壊に至るまでの数値シミュレーションを実施し、本手法の検証と実構造物への適用性の評価を行うことを目的とする。本手法が、実鋼構造物における疲労亀裂進展・破壊のシミュレーションに対し有効であることが明らかとなれば、従来の、応力集中の解析ならびにS-N曲線へのあてはめ、といった古典的手法から、直接、疲労亀裂の進展に関する解析を実施し、その進展予測に基づいた適切な対策を講じる有効な方法論を提供することができると考えられる。

## 2. 疲労亀裂伝播試験

豊貞らによる疲労亀裂伝播試験が、図-1に示す中央貫通切欠付試験片を用いて、応力比 0.05, 0.3 および 0.5 の条件下における一定振幅荷重下でなされている。

## 3. 解析方法およびモデル

VCE法を用いて応力拡大係数の解析を行ない、疲労亀裂進展則として、次のWalkerの式を用いた。

$$\frac{da}{dN} = C \{K_{max}(1-R)^n\}^m = C \{\Delta K(1-R)^{n-1}\}^m$$

具体的には図-2のような手順で行い、ソリッド要素によりモデル化した。要素分割は図-3のように亀裂近傍は1mmを基本とし、他の遠方は5mmとした。また、疲労亀裂伝播試験と条件を合わせることにし、表-1のような条件および応力比にて解析を行なった。

また、荷重は、表-2のように試験計測値をグラフより読取った値を使用し、Cは、豊貞により提案されている $\Delta K_{RP}$ を用いた疲労亀裂伝播則から求めたものを採用した。

また、R=0.05については、計測値にばらつきが見られたため、想定できる2通りを解析することとした。

## 4. 解析結果

応力比：0.5のものを例に1/4のコンター図を図-4に示す。また、疲労亀裂伝播試験における繰り返し数と亀裂長の関係について計測値と解析値を図-5に示す。計測値と解析結果は、R=0.3 および R=0.5 の場合一致しており、R=0.05 の場合については、C=1.940×10<sup>-11</sup>(解析 A)のほうがC=1.487×10<sup>-11</sup>(解析 B)よりも、よく一致している。このことから、パリス則(Walker 式)における指数や定数を得ておけば、亀裂の進展速度および疲労寿命が予測できると言える。

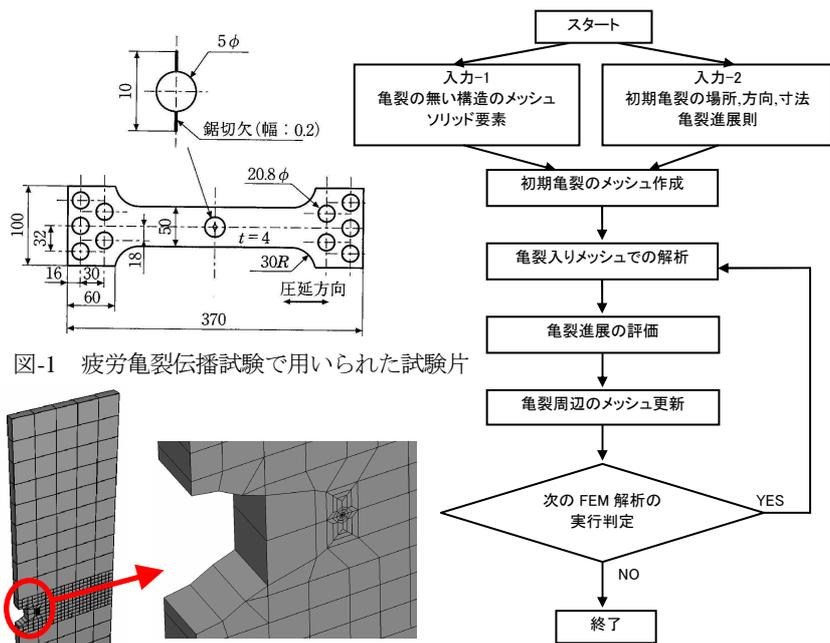


図-1 疲労亀裂伝播試験で用いられた試験片

図-2 疲労亀裂進展解析のフローチャート

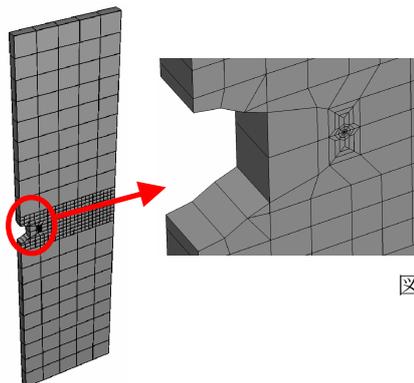


図-3 解析モデルおよび亀裂先端部の拡大図

表-1 解析の条件および応力比

初期亀裂半径	0.1mm
ヤング係数	200000MPa
ポアソン比	0.3
パリス則 (Walker 式) における指数	m=2.7, n=0.5
応力比(R)	0.05,0.3,0.5

表-2 荷重およびC

R	P <sub>max</sub> (kN)	P <sub>min</sub> (kN)	C
0.05	23	1.15	1.940×10 <sup>-11</sup>
			1.487×10 <sup>-11</sup>
0.3	31	9.3	1.378×10 <sup>-11</sup>
0.5	36	18	9.204×10 <sup>-12</sup>

キーワード；破壊力学，応力拡大係数，亀裂進展特性，等価応力範囲

連絡先；〒290-8580 千葉県市原市八幡海岸通3 TEL 0436-43-8110

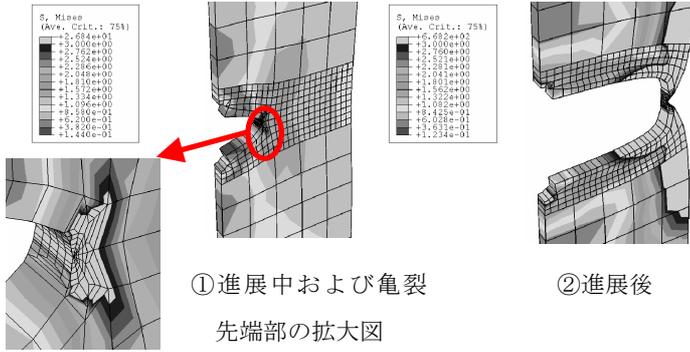


図-4 応力比：0.5のコンター図

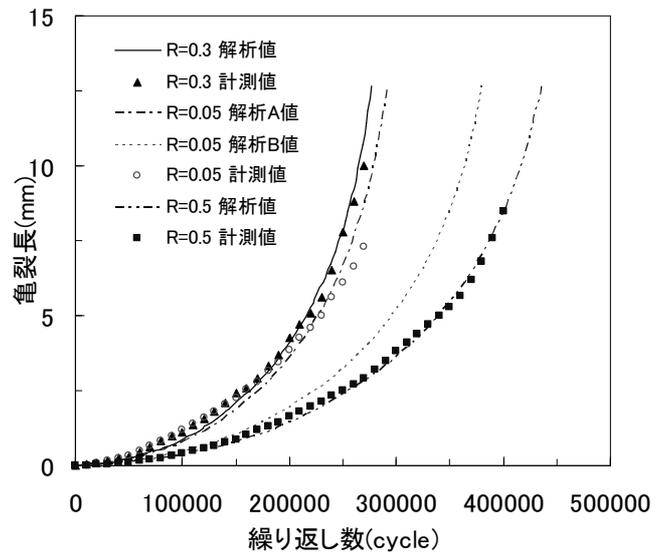


図-5 疲労亀裂進展曲線の解析値と計測値

5. 解析による等価応力範囲の検証

実構造物において作用する活荷重は常に変動しているが、一般に等価された一定振幅応力が用いられている。応力範囲頻度分布を構成する各々の応力範囲を  $\Delta\sigma_i$ 、 $\Delta\sigma_i$  の頻度を  $n_i$  として、設計寿命内の変動振幅応力と同じ繰り返し数で等価な疲労被害を与える等価応力範囲  $\Delta\sigma_e$  は

$$\Delta\sigma_e = \sqrt[m]{\frac{\sum \Delta\sigma_i^m \cdot n_i}{\sum n_i}}$$

て、R=0.3 および R=0.5 の場合について、直接変動応力範囲にて亀裂進展解析を行なったものと、上式から得られる等価応力範囲を一定応力範囲として亀裂進展解析を行なった結果を比較検証することにより、等価応力範囲の妥当性を確認するものとする。

6. 進展解析における応力範囲の設定

本論文においては、変動応力範囲は2種類の応力範囲が存在する場合を考える。一定応力範囲と同一の等価応力範囲における解析結果を比較検証するため、R=0.3 の場合は 108.5MPa とし、R=0.5 の場合は 90MPa とすべく表-3 のように設定し、 $\Delta\sigma_1$  と  $\Delta\sigma_2$  の存在比率を3パターンとして解析を行なった。

表-3 変動応力範囲の設定

R	No	$\Delta\sigma_1$ (MPa)			$\Delta\sigma_2$ (MPa)			$n_1:n_2$
		$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}-\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}-\sigma_{min}$	
0.3	①	192.857	57.857	135.000	65.001	19.500	45.501	1:1
	②	192.857	57.857	135.000	125.976	37.793	88.184	1:2
	③	192.857	57.857	135.000	137.049	41.115	95.935	1:3
0.5	①	220.000	110.000	110.000	100.530	50.265	50.265	1:1
	②	220.000	110.000	110.000	150.723	75.361	75.361	1:2
	③	220.000	110.000	110.000	161.684	80.842	80.842	1:3

7. 疲労亀裂進展解析による結果

疲労亀裂進展解析による結果を表-4 に示す。疲労寿命(N)においては、等価応力範囲を一定振幅応力範囲として解析した方が、数%安全側となる結果が得られた。同一の等価応力範囲で比較すると、応力範囲が大きいものを多く含む方が、寿命が若干長くなる傾向が見られた。これらの結果から、本解析においては等価応力範囲を一定振幅応力範囲として用いることは妥当であると言える。

表-4 各応力範囲の疲労寿命

R	応力範囲	繰返し数(N) (破断時)	変動/一定 (%)
0.3	一定	288,838	
	変動①	303,069	105%
	変動②	294,131	102%
	変動③	292,035	101%
0.5	一定	454,744	
	変動①	472,177	104%
	変動②	461,412	101%
	変動③	458,788	101%

8. 疲労亀裂進展解析による結果および今後の課題

亀裂の進展速度において、亀裂進展解析の結果と実験結果が一致したことから、本手法が問題ないと言える。また、等価応力範囲を用いた一定振幅応力範囲での解析結果は、数%安全側の結果となったことから、精密なシミュレーションが必要な場合は、本解析手法により直接変動応力範囲を用いることが可能であると言える。

円形状や細幅の切欠がある場合、亀裂進展に伴い、解析が不可能となることが多々あった。亀裂進展解析に適切なメッシュ作成方法についての手法の確立が必要である。また、Cやmなどのパリス則における定数や指数により、解析結果が異なることから、実験データを整理し、これらの定数や指数を決定する手法の確立も不可欠である。

参考文献

1) 社団法人 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 1993.4.  
 2) Toyosada M, Gotoh K, Niwa T : Fatigue crack propagation for a through thickness crack: a crack propagation law considering cyclic plasticity near the crack tip. International Journal of Fatigue 26 pp.983-992, 2004.