

岡山大学工学部 正会員 ○ 谷口 健男
 富士通岡山システムエンジニアリング 松本 肇

1. まえがき 今日、FEMを用いたき裂解析は、鋼構造、コンクリート構造および岩盤等さまざまな分野で研究が進められている。この方法は、取り扱うメッシュモデルにより、得られる解が支配され、特に、き裂先端部のように、応力の特異性を有するような場合、そのモデル化には注意を要すると言えよう。本研究の目的は、2次元問題に限定して、き裂解析におけるFEMモデルの設定上の注意点および精度、経済性の向上を図るためのズームング技法について考察を加える。なお第2節では、境界条件が設定された時のFEMモデル設定上の、そして、第3節では、境界条件の設定上の注意点に言及する。

2. き裂解析のための有限要素モデル 本節では、境界条件が設定された時、き裂を含む領域のメッシュ分割について言及する。用いる要素は、き裂先端部については特異アイソパラメトリック要素、その他の領域は、アイソパラメトリック要素であり、対象とする問題は、既に、十分に解が知られている問題¹⁾を取り扱う。なお、以下では、次のような記号を用いる。2W:モデルにおける全幅、a:き裂半長、L:き裂先端最小要素長 L/aの応力拡大係数への影響を調べるため、境界条件の設定が容易である、片側き裂入り3点曲げモデル(図1)を用いて解析を行った。応力拡大係数の算定法としては、変位法²⁾を用いる。この結果を図2に表す。L/aの値が0.1以下の範囲では、十分な精度が得られるとしてよい。しかし、このことは、き裂先端要素をできる限り小さくすればするほど良い結果が得られると言うことではなく、き裂先端周りの要素分割も重要な役割を果し、き裂先端周りは同じメッシュ分割で3要素ぐらいが必要であることが数値実験より求められた。次に、

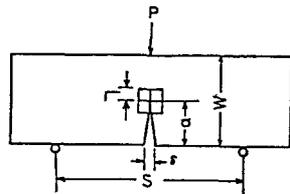


図1 3点曲げモデル

a/Wの値が応力拡大係数に与える影響を調べるために、モデルの条件をメッシュ分割パターンは同じ、上の結果より L/a=0.1と

定め、aの値だけを変化させて解析を行った。その結果を図3に表した。a/W<0.2の範囲で小さくなるほど解析解が理論解より離れる。これは L/a=0.1を満たすように、き裂先端のメッシュ分割が行われているので、き裂外周部要素には大きなひずみが生じてくるためである。この解決策としては、メッシュ分割における節点数を増加させる方法が考えられ、き裂外周部により多くの要素を配置し、少しでもメッシュのひずみを小さくすることが必要となる。

そこで、節点数の増加を約1.5倍として解析を行った。その結果、解の向上となったといえる。さらに、モデル全体を等分割してメッシュにひずみが生じさせないことが良い結果を得るための条件である。しかし、等分割したのでは節点数、要素数が膨大で計算機の容量が問題となり、計算機の容量内で解析を行ったとしても、その解析に要した演算時間(CPU)はきわめて大きくなる。また、き裂先端と外周辺との間に緩和領域を用いても要素形状のひずみが生じることはやむをえないことである。この解決策の一つとして、ズームング技法が挙げられる。

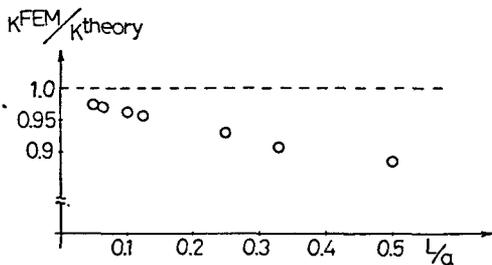


図2 L/aによる精度の比較

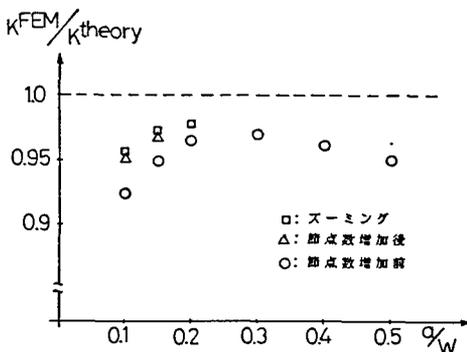


図3 a/Wによる精度の比較

3. ズームング技法 ズームング技法とは、多段階解析による精度向上法である。最初に全体解析としてき裂先端を考慮した上で、全領域を比較的粗く分割し解析する。次に、き裂周辺解析として、上の数値実験の結果より、き裂先端に $l/a=0.1$ 、3層の細かいメッシュを含むように分割する。また、き裂周辺解析の境界上の節点に、全体解析によって得られた境界上の節点の変位を補間した値を代入することによって、応力拡大係数を求める。必要ならば、更に、同じ手続きを繰り返すことによって、き裂周辺の解析を行う。このズームング技法の問題点としては、第一に前段階でのメッシュサイズ、第二に補間関数、第三に次の段階に

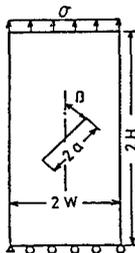


図 4

用いるズームング領域、の3点が挙げられる。これらの問題点の解決策として、まず最初に、K1、K2の混合モード型である一様引張りを受ける中央傾斜き裂入り帯板試験片(図4参照)を用いて数値実験をおこなった。モデルの条件は $a/W=0.2, \beta=45^\circ$, $H/W=2$ で行った。表1の a), b), c) はズームング領域は同じであるが、き裂半長を 1、2、3分割と変えて、それぞれの補間関数に1次関数、2次関数、中央傾斜き裂モデル2次スプライン関数を用いてズームングを行った結果である。また全体解析では、 $l/a=0.1$ および3層の細かいメッシュ分割を含んで一度に解析を行った。この全体解析と比べると a) ではズームング後の値でさえ精度的に劣っている。これは、1分割ではき裂先端の変位、応力が十分に評価されていないためである。b), c) については、解析解は全体解析より精度良く求められており、CPUを比較すると、2分割では約半分、3分割でもCPUの低減の効果はあるといえる。これらのことより、前段階での境界上の変位の精度が、ズームング後の解に影響するといえる。以上より、き裂周辺解析を行う場合、この前段階としてのメッシュ分割はき裂半長 aを2分割程度でよく、さらに精度良く求めるならば3分割することで十分であるといえる。また、補間関数は2次関数、1次関数、2次スプライン関数の順で精度が良くなっており、この三つの方法に大きな差がないのは、前段階で求められた境界上の変位が滑らかに変化している、1次関数で十分補間出来たことを意味している。また、ズームング領域については、き裂先端より境界までの距離が問題となるが、次の段階でのメッシュ分割ではずんだ要素を作らない程度の領域であることが大切である。

表 1a) 補間関数による比較.

	K1(%)	K2(%)	節点数	CPU
ズームング前	113.5	111.5	296	11.1
ズームング後				
1次	96.2	97.0	397	32.5
2次	96.5	96.5	397	32.5
2次スプライン	96.4	97.9	397	32.5
全体解析	97.4	96.9	864	99.1

表 1b) 補間関数による比較.

	K1(%)	K2(%)	節点数	CPU
ズームング前	105.0	103.8	432	21.8
ズームング後				
1次	98.2	98.0	397	32.4
2次	98.2	97.4	397	32.5
2次スプライン	98.3	98.9	397	32.5
全体解析	97.4	96.9	864	99.1

表 1c) 補間関数による比較.

	K1(%)	K2(%)	節点数	CPU
ズームング前	102.4	102.2	740	47.4
ズームング後				
1次, 2次	99.0	98.5	397	32.4
2次スプライン	99.1	99.7	397	32.4
全体解析	97.4	96.9	864	99.1

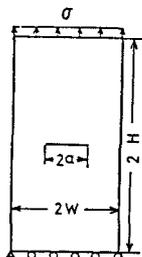


図 5

中央き裂モデル

以上の条件を満たすようにズームングを用いて各々のモデルの解析を行った。図5にあらわす、一様引張りを受ける中央き裂入り帯板試験片について、 $H/W=2$ を条件として a/W の値を変えて解析を行った。その結果を表2に表す。

表 2 ズームング技法による精度の比較

	ズームング			全体解析	
	a/W	0.1	0.2	0.1	0.2
精度 (%)	98.7	99.0	98.6	93.3	98.8
CPU	48.3	48.6	50.0	102.6	106.6

4. あとがき ズームングを用いた解析は、前段階までの値が大きく影響を及ぼすといえ、その値が精度良く求められるならば、精度の向上およびCPUの低減に十分効果のある解析法であるといえる。

<参考文献> 1) 國尾 武、中沢 一、林 郁彦、岡村弘之 編集 "破壊力学実験法" 朝倉書店
 2) A.R.Ingraffea "Numerical modeling of fracture propagation" Rock Fracture Mechanics (ed.HP.Rossmaith), Springer-Verlag P151-208