

I-14 SBFEM の亀裂進展解析への適用について

愛媛大学 学生員 ○Santosh Shrestha

愛媛大学 学生員 米田 伸樹

愛媛大学 正員 大賀 水田生

1. 概説

土木構造物や建築において、老朽化した構造物の維持管理の観点からも構造物の破壊状況を把握し、的確な補修点検が重要となっている。しかし、亀裂問題は複雑な問題であるため、亀裂先端近傍の破壊状況を把握する解析手法も複雑となる。そのため、亀裂問題に対して単純で効果的なシミュレーションが可能であり、複雑な構造物に対しても正確で、信頼できる解を得ることのできる解析手法が求められている。“Scaled Boundary Finite Element Method”(SBFEM)と呼ばれる解析手法が1990年代中ごろに開発されているが、この解析法は、FEMやBEMと比較し、単純な解析法でありながら、特異な応力集中の起こる場での解析において、精度良く且つ効果的に解析が行えることが明らかになっており、亀裂問題に対して有効に適用できることが期待される解析法である。しかし、SBFEMはいまだ開発中の解析手法であるため、亀裂問題への適用は十分に行われていない。そこで本研究では、亀裂問題に対するSBFEMの解析精度及びその効果について明らかにし、亀裂先端の特異な応力状態を特徴づける破壊パラメータ解析への適用を試みる。さらには、亀裂進展方向の予測を行う亀裂進展解析へのSBFEM適用の可能性を試みる。

2. SBFEMによる亀裂進展解析

SBFEMによる2次元静的弾性問題において領域内の応力及び変位場を表す式が、極座標を用いて以下のよう

$$\sigma(\xi, \eta) = \{A_0 \hat{r}^{1/2}\} r^{-1/2} + \{A_1 \hat{r}^0\} r^0 + \{A_2 \hat{r}^{-1/2}\} r^{1/2} + \dots + \{A_{n-1} \hat{r}^{n-2/2}\} r^{n-2/2} = \sum_{i=0}^{n-1} A_i \hat{r}^{-(i-1/2)} r^{i-1/2} \quad (1)$$

ここで、 $\hat{r}$ はScaling Centerから境界節点までの距離を示す。式(1)とWilliamsの応力展開式において r の次数による係数を比較することで、SBFEMによる亀裂先端近傍の応力拡大係数、T-stress、及び高次項の応力係数を得ることができる。以上の関係式より、SBFEMによる破壊パラメータの解析を行う。次に、線形弾性状態における亀裂進展解析を行うためには、亀裂進展方向を決定する必要がある。本研究では亀裂進展方向を決定する破壊規準に、最大縁応力に関する破壊規準を適用する。

$$\text{SIFs for Mode I} \quad K_I = c_i \sigma_y \sqrt{2\pi \hat{r}} \quad (2)$$

$$\text{SIFs for Mode II} \quad K_{II} = c_i \hat{\tau}_{xy} \sqrt{2\pi \hat{r}} \quad (3)$$

$$\text{T-stress} \quad T = c_i A_1 \quad (4)$$

$$\text{高次項係数} \quad q_n = c_i A_n \hat{r}^{-(n-2/2)} \quad \forall n = 3, 4, 5, \dots \quad (5)$$

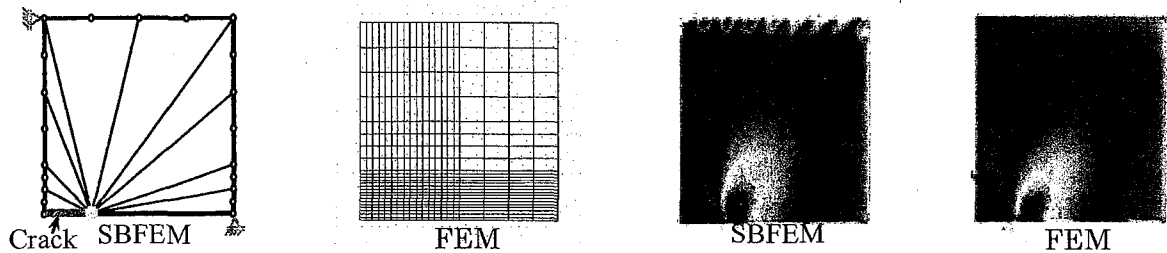
$$K_I \sin \theta_0 + K_{II} (3 \cos \theta_0 - 1) + \frac{16}{3} T \sqrt{2\pi r_c} \sin \frac{\theta_0}{2} \cos \theta_0 = 0 \quad (6)$$

式(6)において、 r_c はプロセスゾーンの長さであり、 K_I, K_{II} 及び T が既知であるならば亀裂進展角度 θ_0 は容易に求めることができる。そして亀裂進展長さを初期亀裂長さの4%と仮定し解析を行うことで亀裂進展位置を決定することができる。(尚、亀裂進展長さを決める基準はいまだ確立されておらず、現段階ではユーザーの仮定で決定されている。)

3. 亀裂問題に対するSBFEMの解析精度及びその効果

SBFEMによる亀裂問題の解析精度及び効果について明らかにするために、FEMによる亀裂解析と比較をおこなった。図.1に両解析法の要素分割例及び、応力分布図を示す。尚、解析モデルは上下に引っ張り力を与えた亀裂を含む部材で、亀裂位置を軸に上下対象を想定しており、解析では上半分のみを用いている。

SBFEMではFEMと比較し約4%程度の節点数(自由度)でほぼ同等の応力状態を捉えることができた。以上の結果より、SBFEMはFEMと比較しより少ない節点数(自由度)で精度の高い解析が行うことが可能であり、亀裂問題に適した解析手法であるといえる。



(Node=21, DOF=40) (Node=525, DOF=1024) (Node=21, DOF=40) (Node=525, DOF=1024)

図.1 SBFEM,FEMの要素分割例&応力分布図

4. SBFEMによる破壊パラメータの解析

表.1 集中荷重を受ける梁部材

亀裂先端近傍の応力係数 (Mode I)

	SBFEM	HCE*	Error(%)
1st	1.8544	1.853	0.08
2nd	-0.3529	-0.3533	-0.11
3rd	-0.7212	-0.7149	0.88
4th	-0.0950	-0.0896	6.03
5th	-1.3860	-1.3717	1.04
6th	2.2783	—	—
7th	-2.5382	—	—
8th	-3.9779	—	—
9th	7.6740	—	—
10th	16.8366	—	—

*Xiao&Kaliharoo 2004

SBFEMを破壊 Mode I 及び, Mode I と Mode II が混在する Mix Mode での破壊パラメータ解析に適用し, 得られた破壊パラメータを参考論文より得られた他の解析手法による結果と比較した。Mode I の結果を表 1 に示す。Mode I において, 誤差は最大 6%程度であり, 表 1 にあるように, SBFEM では第 10 項までの高次項係数を求めた。また Mix Mode では両解析の誤差は 4%程度であり概ね一致する。SBFEM では応力拡大係数 SIFs のみならず, T-stress, さらに高次項の係数も SBFEM を適用し解析を行うことができ, 効果的かつ正確な破壊パラメータの解析が行えることが明らかとなった。

5. SBFEMによる亀裂進展解析

SBFEMによる亀裂進展解析の可能性を検討するため, まず従来の SIFs のみを考慮した亀裂進展解析を行い, SBFEM と Meshless Method を用いた FEM による亀裂進展解析の結果を比較した。尚, 解析には Mix Mode のモデルを用いている。図.2 にその結果を示す。両解析により得られた亀裂進展軌道は, よく似た傾向を示すことが明らかとなった。一方, T-stress を考慮した場合(図.3), 亀裂進展軌道は, プロセスゾーンが広がるに従い, T-stress による影響が増加し亀裂進展角度は減少していくことが明らかとなった。

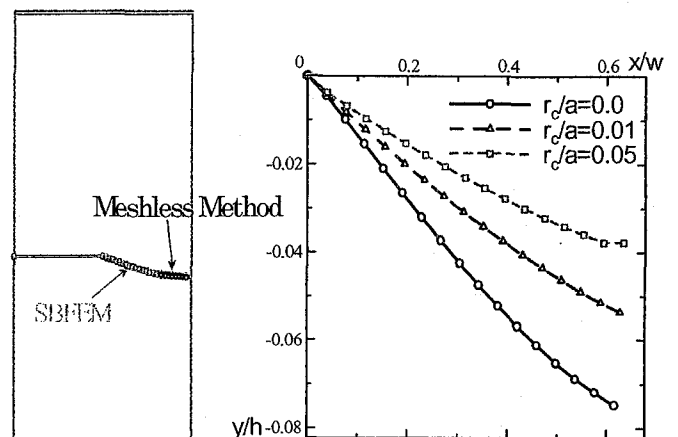


図.2 亀裂進展軌道比較
(SIFs のみの場合)

図.3 亀裂進展軌道
(T-stress を考慮)

6. 結論

SBFEMにより得られた SIFs, T-stress, 及び高次項の係数は他の解析法により得られる係数とほぼ一致しており, SBFEM を用いて亀裂先端近傍の破壊パラメータを精度良く求まることが明らかになった。さらに, SBFEMにより得られた破壊パラメータを用いて, 亀裂進展解析が行うことができること, T-stress が亀裂進展軌道に影響を及ぼすということが明らかとなった。

今後の展望として, SBFEM では高次項の応力係数を求めることができることから, さらに精度の高い解析を行うために, これらの高次項の係数を含めた亀裂進展解析を行うことが期待できる。