

脆性材料における高精度離散き裂進展シミュレータの開発

琉球大学大学院 学会員 ○ 江戸 孝昭
琉球大学 正会員 松原 仁
琉球大学 正会員 原 久夫

1. はじめに

岩石・岩盤における破壊力学は、有限要素法等の数値解析手法を用いて発展してきた。しかしながら、き裂進展解析のように高度なリメッシング技術を要する問題では計算効率が著しく低下すると考えられる。そこで本研究では、弾性範囲において高精度な解が得られる Enriched Free Mesh Method (EFMM)¹⁾ と、付帯条件付き多次元型移動最小自乗法²⁾を併用した高性能き裂進展解析手法を開発し、本手法の妥当性の検証を行った。

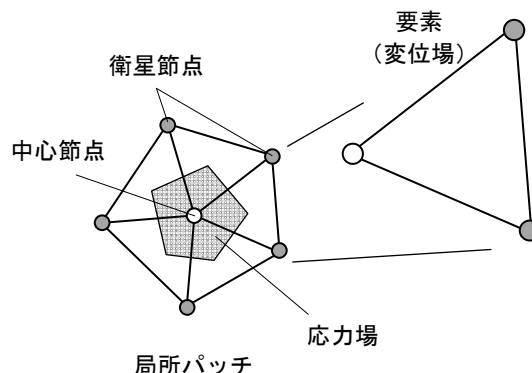


図 - 1 変位場－応力場の概念図

2. Enriched Free Mesh Method¹⁾

EFMM では図 - 1 に示すように、変位場を要素毎に定義し、応力場を要素の集合である局所パッチ毎に定義する。この時、変位場と応力場は独立しているため、本研究では、変位場と応力場を関連付ける方法として、次式にて示される Hellinger-Reissner の変分原理³⁾を用いた。

$$\Pi(\sigma, \mathbf{u}) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} (\sigma(\mathbf{x}))^T \mathbf{D}^{-1} \sigma(\mathbf{x}) d\Omega + \int_{\Omega} (\sigma(\mathbf{x}))^T \mathbf{B} \mathbf{u} d\Omega - \int_{\Omega} \mathbf{u}^T \mathbf{b} d\Omega - \int_{\Gamma} \mathbf{u}^T \mathbf{t} d\Gamma \quad (1)$$

ここで、 σ : 応力, $\mathbf{u}$: 変位, $\mathbf{B}$: 変位－ひずみマトリックス, $\mathbf{D}$: 応力－ひずみマトリックス, $\mathbf{b}$: 体積力, $\mathbf{t}$: 境界 Γ における表面力, Ω : 局所パッチ領域である。

3. き裂進展解析手法

3-1 き裂ネットワークモデル

岩盤内のき裂は非常に複雑に分布しており、このき裂分布を把握するための手法として、ボーリングコアの観察やボアホールカメラ等によって、き裂分布の情報を直接的に得る方法や、電気探査法等により間接的に分布情報を得る手法がある。しかしながら、き裂分布の情報を正確に得ることは非常に困難であることは自明である。

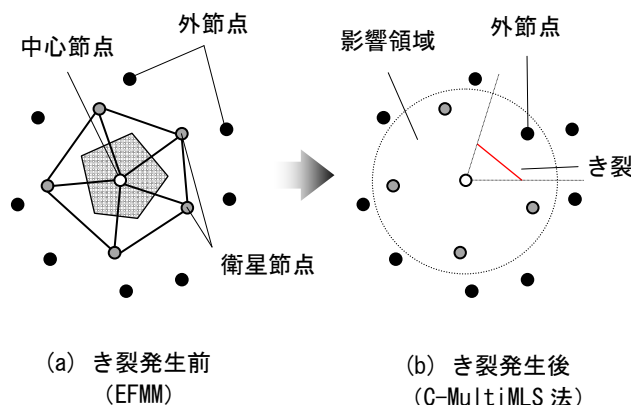


図-2 き裂発生概念図

したがって本研究では、き裂の簡易モデルとして、き裂を各要素の内接円の中心、すなわち内心を結び配置し、簡易的にき裂を表現することにした。

3-2 き裂進展アルゴリズム

き裂の発生条件に関しては、前節で仮定されたき裂ネットワークにある各線分上において評価した。具体的には、線分が配置されている箇所の主応力が任意の引張強度に達した箇所を、き裂の発生箇所とした。また、中心節点の周辺にき裂が発生すると、中心節点と衛星節点との関連性がなくなるため、図-1 に示す EFMM にて定義される領域では計算が不可能となる。

そこで、本研究では、き裂が発生した領域においては付帯条件付き多次元型移動最小自乗²⁾を用いた変位場を用いることにした。本手法の概念図を図-2 に示す。なお、き裂進展に関しては、rmin 法と割線法を用いた。

4. 数値解析例

図-3 に切欠きを有する梁を示す(材料定数は同図参照)⁴⁾。図-3 に示すように、実験では鉄製の梁を通して試験体に荷重が加えられているが、本解析では、同図の A 点と B 点にそれぞれ 0.13P および P の荷重を与えた。

図-4 には、荷重と CMSD (Crack Mouth Sliding Displacement) の関係を示す。同図より、本手法より得られた結果は、最大荷重が多少実験値より低い値となったが、荷重低減域においては、Arrea and Ingraffea の実験値とほぼ近い値となり、ポストピーク領域における実験と解析の挙動は、類似した結果となった。

図-5 に、き裂進展の様子を示す。中央の切欠きからき裂が進展に右上の方に、き裂が進展していく様子が見える。これは、Arrea and Ingraffea の実験においても同様な様子が得られている。

5. おわりに

本研究では、弾性問題における高精度な計算手法である EFMM に、高精度なデータ補間手法である付帯条件付き多次元型移動最小自乗法の概念を導入した、高精度き裂進展解析手法の提案ならびに検証を行った。その結果、実験値とおおむね類似した結果が得られた。

参考文献

- 1) Yagawa, G. and Matsubara, H., Enriched Free Mesh Method: An Accuracy Improvement for Node-based FEM, Computational Plasticity, Computational Methods in Applied Sciences, (2007), pp. 207-220, Springer Published.
- 2) 松原仁, 入部綱清, 伊良波繁雄: 粒子法の微分精度に関する一考察および物理自由度を有する移動最小自乗法, 土木学会論文集 A, Vol. 66, No.4, pp.723-736, 2010.
- 3) Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L.: *Finite Element Method* (5th edition), Vol.1, 2000.
- 4) M. Arrea, A. Ingraffea, Mixed Mode Crack Propagation in Mortar and Concrete, Report 81-13, Department of Structural Engineering, Cornell University, 1982.

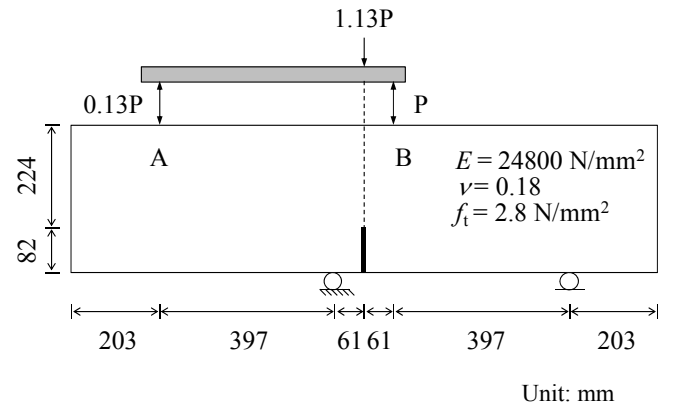


図-3 SENB の概念図

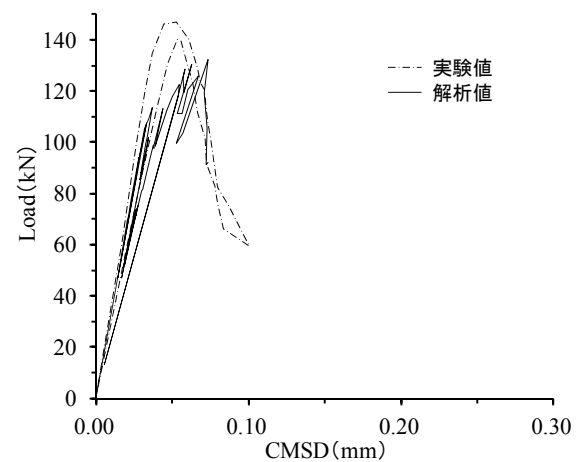


図-4 荷重-変位曲線

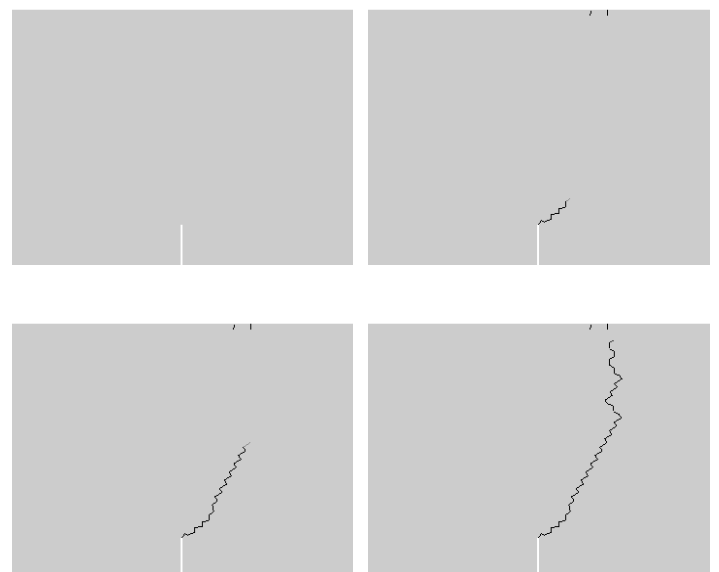


図-5 き裂進展の様子