

脆性亀裂伝播を対象とした高精度有限要素解析モデルの開発

03150975 白井結哉
指導教員 柴沼一樹 准教授

1. 研究背景・目的

近年、国際的に海上物流量が増加する中でコンテナ船の大型化が急激に進行しており、船体に使用される鋼板の板厚増加に伴って脆性破壊によるリスクが懸念されている。安全性を担保するためには、亀裂発生を防止することに加え、発生した亀裂の伝播を制御・停止させることが必要となるが、後者については鋼材のアレスト靱性だけではなく、継手部の形状不連続性を活用した構造アレスト設計が有効である。しかし構造アレスト設計の定量的評価が可能な理論モデルは未だ確立されておらず、喫緊の課題となっている。

単純鋼板における亀裂伝播・停止挙動については局所破壊応力理論に基づく理論モデル[1]が提案されており、支配方程式解明が進んではいないものの、構造アレスト設計ではその形状の複雑さから既存の数値モデルによる評価は困難である。そこで、解析対象の形状自由度が高い有限要素法に局所破壊応力理論を導入することで、構造アレストを含めた、任意の3次元構造中の脆性亀裂伝播・停止挙動の解析が可能になるものと考えられる。本研究では特にロバスト性の高い節点力解放法を用い、3次元 Criterion 型有限要素解析アルゴリズムの開発を目的として研究を実施した。具体的には、まずこの開発の上で課題となっていた亀裂先端近傍における局所応力評価の精度向上を試み、さらにその成果を踏まえて亀裂前縁形状をも考慮した同アルゴリズムを実現した。

2. 節点力解放法における反力減少手法の検討

節点力解放法とは、有限要素法において亀裂伝播経路上に存在する各節点の拘束を逐次解放することで動的亀裂伝播を解析する手法である (Fig. 1)。拘束解放時の節点反力減少手法としては瞬間的な減少手法 (Jump) や線形的な減少手法 (Linear) が代表的であるが、いずれも亀裂先端応力場に 10%以上の誤差を与える場合もあることが示されている。

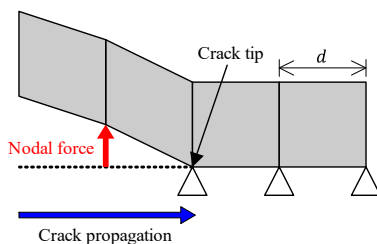


Fig.1 Nodal force release method

そこで、この減少手法の与え方を式(1)における n によって変化させ、応力場の応答に与える影響を比

較検討した (Fig. 2)。 δt は亀裂が 1 要素伝播する時間、 R_0 は解放直前の反力とし、解放開始時刻を $t = 0$ とする。縦軸は解析解[2]との誤差である。

$$R(t) = R_0 \left(1 - \frac{t}{\delta t}\right)^n \quad (1)$$

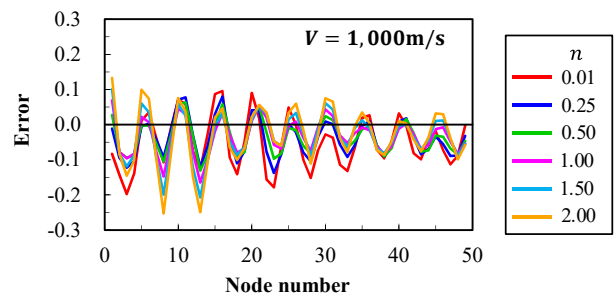


Fig. 2 Stress fields for different n

Fig.2 より、応力場には大きな振動が見られ、 n によってその振幅に違いが見られることが分かる。さらに解析解の応力場を最も高精度に与える n を二分法により求め、その値における応力場を Linear の場合と比較したところ、精度の改善は見られたもののやはり応力場には同様の振動が残った。

3. 節点力解放法に対する数値減衰手法の導入

前節で述べた振動を制御する手法を検討するにあたり、この振動を詳細に解析した。すると、亀裂先端近傍の節点反力が高周波に振動し、それが前方へと伝播する様子が観測された。亀裂先端最近傍節点における反力の時間変化例を Fig. 3 に示す。

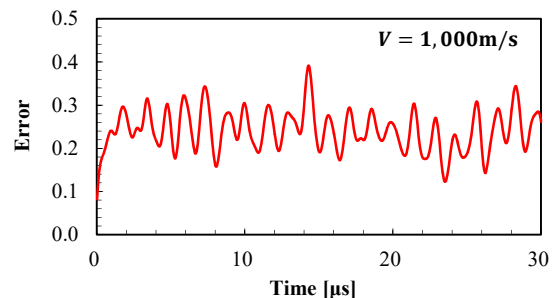


Fig. 3 Vibration of reaction force at node 1

このような振動を抑制するためには、高周波の振動を選択的に制御する手法の導入が効果的であると考え、減衰を考慮した時間積分法である HHT 法の利用、また有限要素解析における数値減衰手法として汎用される Rayleigh 減衰の導入等を行った。その結果、Rayleigh 減衰において剛性行列にかかるパラメータである β 値を適切に与えることで、顕著な

振動制御が得られた。 β を与えた場合の応力場を、そうでない場合と比較し Fig. 4 に示す。

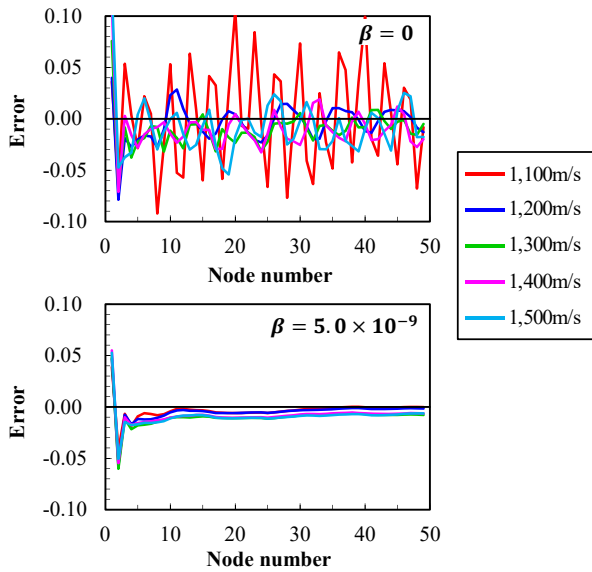


Fig. 4 Stress fields for $\beta = 0$ and 5.0×10^{-9}

ただし、1,600m/s 以上の高速域においては、応力場が全体にやや過小評価されるという課題が残った。そこでこの速度域に対して、2 節で検討した n 値を変化させて与えた。その結果、 n を適切に定めることで応力場の過小性を改善することに成功した。

Fig. 5 に $n = 1.5$ とした場合の応力場の様子を Linear の場合 ($n = 1.0$) と比較して示した。

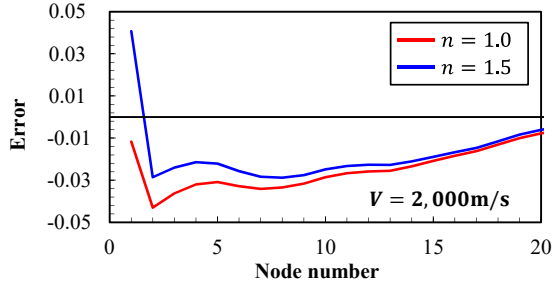


Fig. 5 Stress fields for $n = 1.0$ and 1.5

以上より、Rayleigh 減衰と節点反力減少手法を組み合わせることで亀裂先端前方応力場が非常に高精度に再現できることが分かった。

4. 3次元体における亀裂伝播解析モデルの開発

3次元体中の亀裂伝播に際しては Fig.6 のように亀裂前縁の湾曲が生じ、亀裂伝播・停止挙動に大きな影響を与えることが知られる。そこで本節では前縁形状をも考慮し、局所破壊応力理論に則って3次元 Criterion 型有限要素解析モデルを開発した。

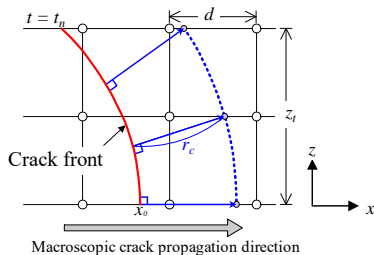


Fig. 6 Three-dimensional crack propagation model

本モデルにおいては前縁形状を式(2)で仮定し、式中の a, k に加えて板厚中心の伝播速度 V を未知数として伝播条件(3)を満たす組をニュートン法により逐次探索している。ただし σ_f は破壊応力であり、その他のパラメータは Fig.6 に示すとおりである。

$$x = x_0 + ad \left(\frac{z}{z_f} \right)^k \quad (2)$$

$$\sigma_{yy}[r_c] = \sigma_f \quad (3)$$

弾塑性体に対する解析を行った一例における V の時間変化を Fig.7 に、前縁形状の履歴を Fig.8 に示す。

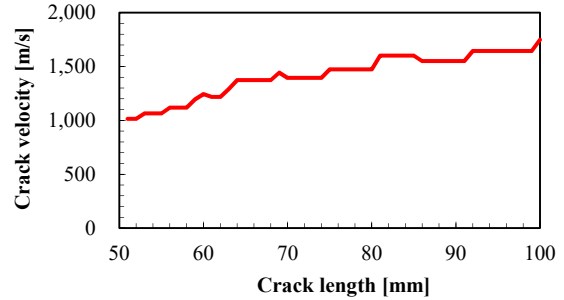


Fig. 7 Velocity at each crack length

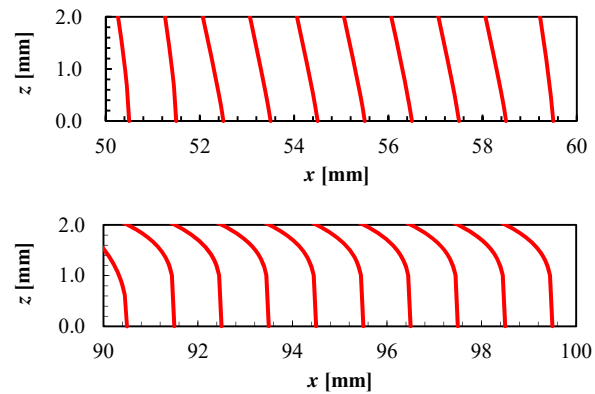


Fig. 8 Transition of crack front with crack propagation

以上の結果より、亀裂進展に伴う伝播速度の増加傾向や前縁の湾曲が再現され、アルゴリズムの妥当性が示された。

5. 結論

本研究では有限要素法による動的亀裂伝播解析手法である節点力解放法に関し、従来より課題となっていた局所応力評価の精度向上を試みた。その結果、節点反力減少手法、数値減衰手法を適切に組み合わせることで、従来に比して非常に高精度に応力場を評価できることが確認された。続いてこの成果を踏まえ3次元 Criterion 型有限要素解析モデルの開発を行った。同モデルによる弾塑性体解析では、実現象と整合した亀裂伝播挙動が再現され、モデルの妥当性を裏付ける結果となった。こうした成果により構造アレスト性能を定量的に評価可能な亀裂伝播モデルの実現に向けた基礎を確立した。

参考文献

- [1] Shibamura *et al.* *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.162, pp.324-340, 2016.
- [2] Broberg, *Cracks and Fracture*, Academic Press, 1999.