

審査の結果の要旨

氏名 柳本 史教

本研究は、鋼材における脆性亀裂伝播・停止挙動について定量的に説明可能な理論モデルの開発を行うことを目的としている。脆性亀裂伝播・停止挙動を記述する際に、応力拡大係数による表現が広く行われるが、このような線形破壊力学に基づくアプローチはアレスト靱性の温度依存性や動的アレスト靱性の温度依存性を説明することができていない。一方で、亀裂先端近傍の局所応力を破壊基準とみなす局所破壊応力理論は脆性亀裂伝播・停止挙動の統一的な説明をするに当たって最も有望な理論の一つとして考えられている。しかし、これまでの局所破壊応力理論に基づいた理論構築において、必ずしも実際の現象に即していない仮定を多数置かざるを得ず、現象に忠実なモデル化がなされていなかった。そこで、本研究では局所破壊応力理論に着目しつつも、系統的な亀裂伝播試験や有限要素解析を用いた数値実験を通して脆性亀裂伝播・停止挙動を明らかにすることで、根拠のある理論モデル開発を行うことを目的としている。また、今後期待される脆性亀裂アレストの実設計への応用に向けて、材料設計・構造設計それぞれの観点から基礎的な検討を実施した。本論文は全 10 章で構成される。

第 1 章は本論文の社会的背景を踏まえたうえで近年のものを中心に関連研究の包括的なレビューを実施することで、既往の研究の到達点とその限界を示している。そのうえで、本研究の目的及び実施する研究内容について述べている。

第 2 章では、脆性亀裂伝播に対して局所破壊応力理論を適用するにあたって基礎的な数値解析ツールである有限要素法における節点力解放法について、その局所応力評価精度を **Generation phase** 及び **Application phase** 双方について検討している。その中で、従来解析手法、特に **Application phase** 解析では局所応力場に大きな振動が生じることから局所応力評価精度が悪化していることを指摘しており、適切な程度の **Rayleigh** 減衰を導入することで高精度な局所応力評価が可能になることを示した。また、解析条件ごとの適切な **Rayleigh** 減衰の水準の決定方法についても提案した。

第 3 章では、鋼材中の脆性亀裂先端近傍の局所応力を実験と有限要素解析を組み合わせることで評価した。このとき、板表面近傍での塑性拘束緩和に伴い生じる亀裂前縁の湾曲・未破断部の形成を有限要素解析に正確に入力することは不可能であることから、事前の有限要素解析を踏まえてサイドグルーブを加工することで塑性拘束の緩和の影響を低減した試験体を用いている。これらの実験及び解析の結果、亀裂先端から特性距離だけ離れた位置における局所応力は試験条件に依存せず、伝播中ほぼ一定になることが示されており、局所破壊応力とみなしうることを示している。

第 4 章では第 2 章の成果を基に、系統的な二次元高速亀裂伝播有限要素解析を行うことで

ひずみ速度依存型弾塑性体中の亀裂先端近傍局所応力の決定因子について調査した。その結果、従来は高速亀裂伝播であれば小規模降伏状態であり応力拡大係数によって局所応力が評価できると考えられていたことに対し、塑性ひずみの蓄積により局所応力はたとえ応力拡大係数が等しくても負荷応力と亀裂長さの組み合わせにより局所応力が変化することを示した。そのほか、温度勾配や速度変化は局所応力にほとんど寄与せず、局所応力は負荷応力、亀裂長さ、伝播速度、温度の関数としてあらわせることを示した。

第 5 章では長大亀裂条件に該当する高負荷応力、広幅の亀裂伝播・停止試験を実施することで従来研究にて仮定された未破断シアリップの効果について検討を行っている。この際、溶接による残留応力の影響を生じる混成型試験体ではなく、一枚の板から切り出した試験体を用いることで溶接による影響を排除したうえで実験を実施した。その結果、従来の数値モデルの計算結果と一致しない実験結果を得た。このことから塑性拘束緩和の程度は有効応力拡大係数、即ち未破断シアリップによる閉口効果を加味した応力拡大係数により決定されることが示唆された。

第 6 章では脆性亀裂伝播・停止挙動に強い影響を生じる未破断シアリップが有する閉口応力及び未破断シアリップ厚さ評価式について 3 次元有限要素解析とシアリップ形成を伴う亀裂伝播試験により定式化を行った。系統的な解析の結果、閉口応力は未破断シアリップ中の塑性ひずみによって概ね一意に決定することができることが分かった。また、3 次元破面計測によるシアリップ厚さの計測を種々の条件で得られた破面に対して実施することでシアリップ厚さの定量的評価を初めて実施した。その結果、シアリップ厚さは小規模降伏時の塑性域寸法と速度の影響を示す関数により評価することができることが導かれた。

第 7 章では、第 6 章までの成果を利用した脆性亀裂伝播・停止挙動シミュレーションモデルの開発が行われた。ここで作成されたモデルは亀裂伝播速度と亀裂前縁シアリップ厚さが未知数となる二つの方程式からなる連立方程式を解くことで計算を実行する。シミュレーション結果は温度勾配型アレスト試験の結果とよく一致した。また、シミュレーション中で実験結果のうち一つから同定された局所破壊応力は 3 章にて実験的に取得した値とほぼ一致したことから、モデルの妥当性が支持されたといえる。

第 8 章では三水準の異なる粒径を有する同じ化学成分のフェライト・パーライト鋼を対象とした小型アレスト試験による簡易的な局所破壊応力の推定実験を実施し、粒径の局所破壊応力への影響を検討した。その結果、粗粒ほど推定された局所破壊応力が大きくなるという結果が示され、へき開亀裂伝播時の微視的抵抗機構と考えられるテアリッジの形成と結びつける議論を行っている。

第 9 章では透明樹脂を用いた構造アレスト試験を模擬した実験及び高速カメラによる亀裂前縁形状の観察が行われた。その結果、継手構造を活用した構造アレスト設計においてはフランジ突入後に亀裂前縁形状が概ね 2 次関数で近似できるような形状を示して伝播することが示された。また、観察結果を踏まえた静的有限要素解析を実施し、構造アレスト設計において亀裂前縁形状の変化により応力拡大係数が減少することを示し、構造アレスト設計によ

る脆性亀裂アレスト性能向上のメカニズムについて考察を行った。

第 10 章では結論を述べている。本論文の成果について各章ごとに簡潔にまとめたうえで、本研究の限界及び今後の展望についても言及している。

本論文の学術的意義として、従来の研究においては多くの仮定に依拠して議論されてきた脆性亀裂伝播・停止挙動について実験や有限要素解析に基づいた包括的な研究を実施し、脆性亀裂伝播・停止挙動を支配する諸因子それぞれのモデル化に根拠を提供したことが挙げられる。また、これらの研究を踏まえたうえで実施した理論モデル開発とその妥当性検証を通じて局所破壊応力理論の基礎確立に寄与したといえる。本論文で実施された研究はいずれも局所破壊応力理論に立脚した脆性亀裂伝播・停止現象解明に向けて設計され実施されたものであり、今後の脆性亀裂アレスト設計の産業応用に向けて求められる基礎的な知見を提供しうるという点で工業的な意義を有する。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。