



Title	混合モード荷重下での耐脆性破壊性能評価のための破壊モデリング
Author(s)	清水, 万真
Citation	大阪大学, 2021, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/85388">https://hdl.handle.net/11094/85388</a>
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉</a> 大阪大学の博士論文について <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈/a〉</a> をご参照ください。

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 論文内容の要旨

氏名 ( 清水 万 真 )

論文題名 混合モード荷重下での耐脆性破壊性能評価のための破壊モデリング

## 論文内容の要旨

本論文は、複雑荷荷が作用する実鋼構造部材の耐脆性破壊評価の精緻化と合理化を目指し、部材の形状・寸法だけでなく荷重モードの影響を受けない材料固有の脆性破壊限界値を評価可能とする新しい破壊指標の提案とその構築を目的とした。

第1章では、構造部材の耐脆性破壊性能評価に適用されてきた従来の手法および破壊モデルを紹介し、混合モード荷重の作用を想定した手法や破壊モデルが構築されていないという課題を示した。そこで本研究では、あらゆる荷重モードに適用可能な破壊モデル構築に向けて、材料中の微視的破壊発生機構に立ち返って部材全体の破壊限界を確率論的に捉える概念であるローカルアプローチに着目することを述べた。

第2章では、混合モード荷重下での脆性破壊特性の取得実験について述べた。Mode I 荷重下で塑性拘束の強い条件である深い亀裂材の三点曲げ試験を基準に、亀裂深さを浅く変化させた塑性拘束の緩い条件、および載荷方法を変化させてMode I + Mode IIの混合モード荷重を作用させた条件を対象に、それぞれ低温での脆性破壊限界を取得した。

第3章では、従来破壊モデルの「Beremin model」を参照して混合モード荷重下の破壊限界評価を試みて、従来モデルの課題を述べた。従来モデルに基づく破壊指標のワイブル応力は、Mode I 荷重下において亀裂深さ（塑性拘束）の影響を受けず材料固有の破壊限界値（限界ワイブル応力分布）を与えたが、これに比べて混合モード荷重下の限界ワイブル応力は小さい分布を呈した。この要因を、混合モード荷重下の亀裂先端近傍の組合せ応力状態がMode I 荷重下と大きく異なることに着目して考察した。

第4章では、弾塑性破壊力学ベースの破壊発生駆動力として円盤状微視亀裂に作用する局所 $J$ 積分, Local- $J$ を考え、三次元組合せ応力下での定性的特徴を線形エネルギー解放率と比較した。この際、Local- $J$ の三次元組合せ応力場における理論解は存在しないことから、円盤状微視亀裂を含むユニットセルモデルの弾塑性解析の結果から非線形エネルギー解放率としての定義に従ってLocal- $J$ を算定した。その結果、混合モード荷重下の亀裂先端の破壊発生駆動力を適正に捉えるには、Local- $J$ の導入が有効であることが示唆された。

第5章では、Local- $J$ 基準の破壊発生条件を取り入れた微小領域の破壊発生モデルを、微小領域に作用する一様な三次元組合せ応力を想定して構築し、これを応力勾配が存在する亀裂先端の体積に拡張することでマクロ亀裂部材の破壊発生指標を提案した。三次元組合せ応力がLocal- $J$ に及ぼす影響を代表する微小領域の破壊指標として「Local- $J$ 等価応力」を定義した。また、塑性ひずみ負荷に伴う破壊発生駆動力の低減効果を、円盤状亀裂の開口鈍化に伴う「駆動力低減係数」によって表現した。この「Local- $J$ 等価応力」と「駆動力低減係数」に及ぼす組合せ応力の影響を、パラメトリックな条件で行ったユニットセルモデルの弾塑性解析結果を回帰して材料の加工硬化特性の影響も含めて定式化し、両者を組み合わせることで、塑性域内部における組合せ応力下での個々の微視亀裂での破壊発生モデルを構築できた。これを、微視亀裂のランダム配向を考慮しながらローカルアプローチの概念に基づいて応力／ひずみ勾配のある領域に拡張することで、マクロ亀裂部材の新たな破壊指標「拡張ワイブル応力」を導いた。

第6章では、第2章の実験を参照して提案指標「拡張ワイブル応力」による破壊評価の妥当性／有効性を検証した。提案モデルに基づき評価した混合モード荷重下の限界拡張ワイブル応力は、Mode I 荷重下のそれと近い分布を呈したことから、拡張ワイブル応力が亀裂寸法（塑性拘束）および荷重モードのいずれにも依存しない破壊限界値を与えることのできる指標であることを検証できた。また、Mode I 荷重下の試験で決定した脆性破壊限界拡張ワイブル応力分布から、混合モード荷重下の破壊限界の予測が可能であることを示し、混合モード荷重下での破壊評価に提案破壊モデルを適用することの妥当性／有効性を述べた。

第7章では、本論文で得られた主な結果をまとめた。

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( 清 水 万 真 )			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	大畑 充
	副 査	教授	望月 正人
	副 査	教授	井上 裕滋
	副 査	准教授	三上 欣希
<b>論文審査の結果の要旨</b>			
<p>実鋼構造部材には、一般に単純な引張荷重だけではなく曲げやねじりなどが重畳した複雑荷重が作用する。これに起因して部材造中に存在し得る亀裂状欠陥には、亀裂開口方向荷重 (Mode I荷重) だけでなく面内/面外せん断荷重 (Mode II荷重, Mode III荷重) の混合モード荷重や多軸荷重などの複雑な荷重が作用する。しかし、このような複雑な荷重が作用する場合の統一的な破壊支配パラメータは存在せず、構造安全性を保証するための合理的な評価手法の構築が期待されている。</p> <p>本研究はこのような背景から、複雑荷重が作用する実鋼構造部材の脆性破壊評価の精緻化と合理化を目指し、部材の形状・寸法だけでなく荷重モードの影響を受けない材料固有の脆性破壊限界値を評価可能とする新しい破壊指標の提案とその構築を目的とした研究を行っている。本論文で得られた主な結論をまとめると以下のようである。</p> <p>(1) 炭素鋼のへき開破壊の微視的機構に基づいた破壊モデルとして提案されてきた Beremin に着目し、Mode I 荷重を受ける塑性拘束状態が異なる 2 種類の試験片、および Mode I と Mode II の混合モード荷重を受ける亀裂部材の脆性破壊限界をワイブル応力を用いて評価した結果、両者の破壊限界を統一的に評価できないことを実証している。また、従来のワイブル応力は亀裂先端近傍の最大主応力を主たる破壊支配応力として導かれた破壊指標であるが、混合モード荷重下と Mode I 荷重下では亀裂先端近傍の主応力比 (最大主応力に対する中間主応力および最小主応力の比) が異なることが、両者の限界値に差が見られた最大の原因であることを解析的に見出している。</p> <p>(2) 亀裂先端近傍の組合せ応力状態を破壊駆動力に取り入れるべく、へき開破壊の起点となるマイクロクラックからの弾塑性変形下における破壊駆動力に立ち返り、マイクロクラック (円盤状亀裂) を含むユニットセルの弾塑性解析により、単位面積当たりの亀裂進展に要する外部仕事として定義した Local-J (局所 J 積分) を系統的に検討している。この弾塑性ローカル破壊駆動力である Local-J を、組み合わせ応力と材料の加工硬化特性の関数として定式化することに成功し、Beremin モデルを拡張した新たなマクロ破壊指標である「Local-J ベース拡張ワイブル応力」を導く新しい破壊モデルを提案するに至っている。</p> <p>(3) 提案した破壊モデルに基づいて拡張ワイブル応力を用いて評価した混合モード荷重下の脆性破壊限界は、Mode I 荷重下の限界拡張ワイブル応力と比較的良く一致することを示している。すなわち、提案した新しい破壊モデルを用いることで、脆性破壊限界を塑性拘束度や混合モード状態のいずれにも依存せず統一的に評価可能であることを実施している。</p> <p>以上のように、本論文は鋼構造部材を対象として、大規模降伏下での脆性破壊限界を荷重のモードや様式によらず統一的に評価可能な新しい破壊モデルを世界で初めて提案している。さらなる検証結果の蓄積が必要ではあるが、本モデルの適用により、シミュレーションベースの次世代の合理的な耐破壊性能評価・予測に活用でき、我が国のものづくり技術の発展に資するところが大きい。</p> <p>よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。</p>			