

審査の結果の要旨

氏名 広瀬 智史

本論文では、金属損傷に関する非連続的な力学的特性を評価する手法として、損傷・破壊を連続体力学の枠組で評価可能な唯一の理論である連続体損傷力学に着目している。損傷力学はすでに、比較的単純な材料挙動である引張および圧縮破壊などに適用され、大きな成果を上げている。さらに損傷力学は、延性破断寿命の評価、脆性破断寿命の評価、損傷による剛性低下率の評価、クリープ破断寿命の評価、繰返し荷重下の疲労寿命評価などに適用可能なため、今後も多いに活用されるべき理論であるとの認識の下に、本論文の1章と2章では研究背景と基礎理論について述べている。

3章ではまず、熱変動を伴う損傷・破壊解析における損傷力学の問題点について述べている。大きな熱変動、特に低温脆性を伴う問題にも適用可能とするために新しい損傷累積則を提案し、電子部品の熱疲労解析に適用した。具体的には熱サイクルを受ける電子基板上に構成される導線接合部に生じる熱疲労破壊問題を解析した。損傷力学に基づく疲労解析手法として、計算効率の観点から locally coupled approach 法（部分連成解析法）を適用した。商用ソフト ANSYS7.0 を用いて電子基板モジュールおよびその簡易化モデルに対して、繰返し熱変動負荷による熱応力解析を行い、得られた数サイクルの応力履歴を損傷力学構成式に繰返し入力することにより熱疲労破壊寿命予測を行った。解析結果と実験結果を比較することにより、新たに提案した損傷累積則の妥当性を検証した。

4章ではまず、高温域においては損傷発展に加え、析出物の凝集・粗大化によっても材料の軟化現象が生ずることを述べている。続いて、析出物の凝集・粗大化が材料特性に及ぼす影響を数理モデル化した既存の研究例を紹介し、その問題点を指摘した。さらに本論文では、クリープ理論に基づいて軟化現象を記述した軟化発展方程式を提案して、既存の軟化発展式との関連性について考察した。提案式の検証例として、近年問題になっている高 Cr 鋼の溶接部に生じる Type と呼ばれる破壊現象のシミュレーションを行った。また同時に、近年の解析大規模化に伴う計算コスト増に対する解決策として、ペナルティ法による異種要素結合法を提案した。解析結果と対応する実験結果を比較することにより、新たに提案した軟化発展方程式の妥当性を検証した。

5章および6章ではまず、高温金属内における原子の拡散現象について述べている。す

なわち、著しい原子拡散により材料内部に分布しているクリープボイドに生じる表面張力に起因したボイド収縮のメカニズムを説明した。その収縮力を駆動力とした自己修復現象が材料内部のクリープボイドに生じ得ることを述べ、自己修復過程を記述するために損傷力学モデルを拡張した。簡単のため最初に、損傷発展過程と自己修復過程において別の構成式を用いる損傷・修復逐次モデルを提案した。その検証例として引張クリープ試験による予損傷を有する試験片の圧縮クリープ試験における自己修復シミュレーションを行った。計算結果と対応する実験結果を比較することにより、損傷・修復逐次モデルの妥当性を検証した。続いて多軸応力状態に拡張するとともに、損傷発展過程と自己修復過程において同一の構成式を用いる損傷・修復統合モデルを提案した。その検証例として逐次モデルの数値例と同様のシミュレーションを行い、対応する実験結果と比較した。さらに、有限要素法に損傷修復統合モデルを組み込み、複雑な多軸応力が生じる静水圧下加熱による自己修復シミュレーションを行い、修復率を予測した。予測結果を対応する実験結果と比較することにより損傷修復統合モデルの妥当性を検証した。

7章は結論であり、以下の成果が述べられている。

- (1) 温度変動下の損傷・破壊解析に対して損傷力学を適用する際、既存の損傷発展方程式では記述困難な現象が見られたが、低温脆性現象を含む場合にも適用できる損傷累積則を提案し、その有用性を検証した。
- (2) 高温環境下で顕著となる析出物の凝集・粗大化による材料軟化現象を合理的に記述し、軟化現象が著しい第3期クリープ段階を精度良く表現できる軟化発展方程式を提案し、その有用性を検証した。
- (3) 高温環境下で顕著となる原子の拡散現象に起因した自己修復現象を評価できるように損傷力学を拡張した。構成式モデルを適切に同定すれば、多軸応力下の自己修復量を良好に予測可能であることを確認した。

本論文で提案した手法は、非連続的な固体の損傷・破壊挙動を連続体力学の範疇で考慮可能とし、現在広く普及している汎用有限要素解析コードに最小限の手間でインプリメントできるため、今後需要が高まるであろう温度に依存した力学的挙動の非連続的な材料・構造挙動解析において、有効な利用が期待される。

以上を要するに、本論文は金属構造要素のクリープ損傷および自己修復過程の計算モデリング手法を提案し、実験結果との比較により、その設計支援ツールとしての有用性を実証しており、高い工学的価値を有すると判断される。

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。