

論文の要旨

題目 連続体損傷力学を用いた延性破壊に関する研究
(Study on the ductile fracture using continuum damage mechanics)

氏名 山王丸 将吾

機械部品を設計するにあたり強度要件は1つの大きな重要項目となる。強度要件として多くの機械部品では定格負荷において長い寿命を確保しようとする。このため定格負荷環境下では高サイクル疲労破壊に分類される破壊を考える。しかし自動車における衝突やクラッチの急締結、大型建造物の大地震、電子機器の落下衝撃などの定格負荷よりも非常に大きな荷重が入力されるとき、延性材料は大きな塑性変形を伴う。これにより1回の負荷による破壊や極低サイクル疲労破壊を生じる。この際、人命や環境に大きな損害を与えることのないように破壊をコントロールする設計が重要となる。この設計に関して軽量性や低コスト、短期開発を同時に実現しようとする破壊現象の高精度な予測と最小限の試作による開発が必要不可欠となる。このような開発を進めるに当たって近年のコンピュータ資源の進化に伴ってコンピュータシミュレーションが有効な手段となっている。本研究では1回負荷による破壊や極低サイクル疲労破壊を表現するための損傷弾塑性モデルに関する研究を行う。

従来の延性破壊シミュレーションに関する研究には大きく分類すると Coffin-Manson 則によるひずみ振幅から寿命を算出する簡易的な手法、非線形破壊力学による手法、材料損傷モデルによるローカルアプローチによる手法がある。このうち Coffin-Manson 則による手法は簡便に使用できる利点があるものの応力三軸度によるボイド成長の影響や微視的損傷の発達に応じた応力積載能力の低下挙動が考慮されておらず定性的な破壊起点すら予測できないことが多々ある。また非線形破壊力学による手法はJ積分という破壊力学パラメータを用いてき裂進展を評価するが、き裂深さや負荷形式や部材板厚によって破壊靱性値の有効性が失われる拘束効果に関する課題がある。さらに破壊力学は初期き裂が存在していなければ適用できず円孔縁やリブ付け根などの応力集中部からのき裂発生を表現することができないといった課題がある。そして材料損傷モデルによる手法の1つに連続体損傷力学に基づくものがあり、異方損傷や移動硬化則を考慮したモデルなどへ発展してきた。そして様々な損傷問題に適用されており、破壊力学で取り扱うことが困難であったき裂の発生と進展を予測する有効な手段として研究されてきた。しかし連続体損傷力学に関してはまだ実験との詳細な比較を交えながらの検証が十分になされておらず、今後の基礎研究によってそのモデルの妥当性や実用性が大きく高

まる可能性は十分にあると考える. そこで本研究では延性破壊シミュレーションモデルに対する損傷モデルとして連続体損傷力学を用いることとした.

さらに弾塑性モデルのシミュレーションを行う際の流れ則の数値積分に関して従来の研究を見るとモデルが複雑になるほど定式化が比較的容易な前進形 Euler 積分によりモデル化している例が多く, 計算実用性が高いが定式化が煩雑となる後退形 Euler 積分による定式化が行われていない. 両者の手法では計算時間が数倍から数十倍も異なり大型構造物の数値計算には後退形 Euler 法による定式化が必要不可欠であると考え. 以上より本研究では 1 回の負荷による延性破壊から極低サイクル疲労破壊をシミュレーションするために以下の 4 つのモデルが要件であると考えた.

要件① 分割背応力モデルを考慮した複合硬化則の弾塑性モデル

要件② 連続体損傷力学による損傷モデル

要件③ ①と②を連成したモデルの後退形 Euler 法による応力積分およびそれに厳密に整合した Consistent 接線剛性の導出

要件④ 要素積分点毎に破壊判定を与えたき裂発生, き裂進展の表現

しかし既存の研究を見るとこれら 4 つの要件を全て満たすモデルは見られない. そこで本研究ではまず①, ②の要件を満たすモデルの定式化を行った. そしてこのモデルに対してつり合い状態を優れた収束性で得るために後退形 Euler 積分による定式化も行った. さらにき裂進展も可能なモデルにすることで, 実測で比較的観測が容易なき裂発生, き裂進展の側面からモデルの妥当性を評価した. 以下に各章の要点を示す.

第 1 章では本研究の目的と研究背景について詳細に述べた. き裂の発生も含めた損傷モデルとして連続体損傷力学によるものが有効であると考えられる. そして本研究が目的とする極低サイクル疲労破壊の表現には上述の 4 要件が必要であると考えが, 全ての要件を満足するモデルが見当たらない. そのため本研究では 4 要件を満足する損傷モデルとその積分手法を開発し, 実験との詳細な比較によりその妥当性を示した.

第 2 章で延性破壊という損傷弾塑性変形をシミュレーションするために必要な基礎理論について述べた. すなわち本研究では空間の離散化に有限要素法, 動的な問題を扱う時の時間の離散化に Newmark- β 法を用いているためその基礎理論の概要を記した. また計算速度を向上させるために導入した計算並列化に関する基礎理論も記した. さらに第 2 章では第 3 章で提案する損傷弾塑性モデルを理解するために必要不可欠な背景知識として等方硬化非損傷モデルを用いた積分法について詳細に説明する. また残差の力計算収束性向上のために導入した試行増分計算についても触れる.

第 3 章では初めに要件①と要件②に該当する分割背応力モデルと連続体損傷力学の基礎知識に触れる. その後, 本研究で提案するこの 2 つを連成したモデルについて説明し, 要件③の後退形 Euler 積分の定式化を行ってゆく. また計算速度の向上に向けた縮

約積分法への改良について触れる。また焼結材など静水圧が弾塑性変形に大きな影響を及ぼす材料へ拡張するために静水圧依存型の分割背応力型損傷モデルへの改良もその定式化と共に説明する。さらに引張負荷下と圧縮負荷下での損傷の違いを表現するための **Unilateral** 効果のモデルも追加し、より実現象に近いモデルへと拡張している。

分割背応力型弾塑性モデルと損傷モデルを連成したことで同定すべき材料定数は増える。そこで第 4 章ではこれらの材料定数を半自動的に同定するための材料同定システムについて述べる。ここでは単軸負荷試験の実験結果とフィットするように材料定数を逐次変えながら幾度も数値計算を行って行く。その際に計算時間を大幅に削減するために単軸負荷条件下に特化した簡易応力積分法について述べる。

第 5 章ではこれまでに記述した損傷弾塑性モデルを有限要素法に組み込み数値計算を実施する。既存の研究では損傷力学を用いたき裂進展挙動についてまだ多くの未知な部分がある。そこでまずは基礎的なき裂進展挙動を詳細に調べるために **Mode I** 貫通き裂を用いた 3 次元解析を行った。これにより基礎的な延性破壊として知られるシャリップ破壊を含めた破壊領域が連続体損傷力学を用いて表現できるかを実験結果と詳細に比較しながら明らかにした。またき裂進展時の **J** 積分も計算し連続体損傷力学から計算した破壊靱性値が妥当なものか調べた。さらに **Mode I** と **Mode II** の混合モードき裂についても取扱い実験結果との比較から連続体損傷力学によるモデルの妥当性を調べた。この結果を踏まえて段違いき裂についても計算し実験結果との定性的な考察を行った。また塑性加工問題や動的破壊問題そして極低サイクル疲労破壊といった多種の破壊問題についても本モデルでシミュレーションを実施しその定性的妥当性について検証した。

最後に第 6 章では本研究の総括について示した。分割背応力型の複合硬化則と連続体損傷力学を連成した損傷弾塑性モデルとその後退形 **Euler** 積分法について提案した。さらに静水圧依存性や **Unilateral** 効果を考慮したモデルへと発展させた。また後退形 **Euler** 積分法をより高速にするための縮約積分法の開発も行った。このモデルを有限要素法に組み込んだ数値計算と実験結果を比較し、従来の破壊力学では取扱いが困難であったシャリップ領域も含めた延性破壊を表現できることが分かった。また混合モード問題や段違いき裂問題、塑性加工問題にも発展させ実験結果との定性的な比較を行った。その結果、数値計算結果と実験結果が良く一致した。これにより連続体損傷力学に基づくモデルにより様々なき裂発生、き裂進展挙動を表現することができることが分かった。同時に後退形 **Euler** 法の提案により大規模 3 次元損傷解析に対しても高速に計算が可能となった。今後の課題として材料や問題に応じてより以下に示すような詳細なモデルへの改良が考えられる。

- [1] 2 曲面モデルといったラチェット現象をより詳細に表現するモデルへの拡張
- [2] クリープ損傷と熱伝導との連成モデルへの拡張
- [3] コンクリート材などへも適用可能な異方損傷モデルへの拡張