

FDF小委員会

繰返し荷重下での低サイクル疲労および延性破壊に対する評価法の整備に関する調査研究
過大繰返し荷重下の亀裂進展解析法ガイドライン案
(第1案 2019年2月22日)

この資料を引用するにあたっては、下記を明記してください。

(一社)日本溶接協会原子力研究委員会の50周年以降10年間のまとめ資料
(2019年): **FDF小委員会「繰返し荷重下での低サイクル疲労および延性破壊
に対する評価法の整備に関する調査研究」**

目次

1. 適用
 - 1.1 解析方法
 - 1.2 解析手法
 - 1.3 解析コード
2. 試験結果のシミュレーション解析(Generation phase)
 - 2.1 解析条件
 - 2.1.1 解析モデル
 - 2.1.2 材料特性
 - 2.1.3 亀裂進展のクライテリア
 - 2.2 解析結果の処理
 - 2.2.1 出力データの種類, 出力点
 - 2.2.2 ΔJ の評価
3. 亀裂進展解析(Application phase)
 - 3.1 亀裂進展解析のフロー
 - 3.2 亀裂進展則
 - 3.3 ΔJ 解析

1. 適用

本ガイドラインは、CT試験片を対象として、亀裂先端に小規模降伏条件を逸脱する塑性域を伴う繰返し荷重が負荷される条件での数値解析手法を規定し、試験結果をトレース解析する手法、及び亀裂進展挙動を予測する手法の2種類について記載している。本ガイドラインは、繰返し荷重が負荷される亀裂付構造物の亀裂進展解析手法を整備するための準備として策定された。

1.1 解析方法

CT試験片の繰返し荷重下の亀裂進展解析は、1.2及び1.3で述べた解析手法及び解析コードを推奨する。

1.2 解析手法

CT試験片のような亀裂付材料試験片及び構造物には、一般的に有限要素法を用いた弾塑性解析手法が適用される。この他に、亀裂進展クライテリアを解析コードに組み込み亀裂進展挙動を自動的にシミュレートする損傷力学解析法、粒子法などがある。

1.3 解析コード

解析には、検証された解析コードを使用すること。検証方法として、本ガイドに示したサンプル問題を解析し、同様の結果が得られることを確認してもよい。

2. 試験結果のシミュレーション解析(Generation phase)

2章では, 試験結果が得られたときに, CT試験片の亀裂先端やモデル各部位における応力, ひずみの詳細情報を得るため, 試験結果を正確にシミュレートするための数値解析法に対する留意点を記載する。

2.1 解析条件

2.1.1 解析モデル

(1) 要素の種類

有限要素法に用いる要素の種類は, 六面体及び四面体のどちらでもよいが, 高次要素の利用が望ましい。具体的には, 8節点6面体要素, 20節点6面体要素, または10節点4面体要素がある。

(2)要素分割法及びモデル化法

亀裂先端近傍の要素寸法は小さすぎると、亀裂先端の相当塑性ひずみが高くなり計算が収束しないことが多い。その一方、粗すぎると計算精度が悪化する。亀裂進展方向の要素寸法 d と試験片幅 W が $d/W \leq 0.08$ (分割数12分割以上)であることが望ましいが、亀裂前縁方向長さの比(アスペクト比) $1 \leq d/l \leq \text{約}3$ かつ要素寸法が一定であること。

亀裂前縁の形状は、荷重-変位曲線に影響を与えるため、進展形状に合わせたモデル化をすることが望ましいが、モデルが複雑となるため、第一近似として、厚さ方向に平均化した一定深さの初期亀裂及び一定の亀裂進展量をモデル化してもよい。また、計算時間の低減のため、適宜1/2対称モデル、または1/4モデルを適用してもよい。

なお、本ガイドラインに記載したサンプル問題で対象とした試験では、シアリップが観測されているが、サンプル問題の解析ではシアリップのモデル化はしていない。

(3)境界条件

a. 対称境界条件

図2.1に境界条件の例を示す。損傷力学を用いない場合は，亀裂進展を表現するA部は亀裂進展に伴い対象境界条件を削除し亀裂進展を模擬する。

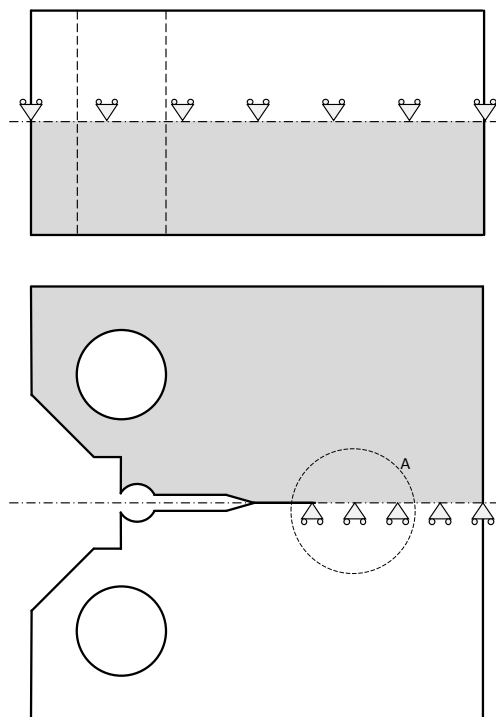


図2.1 対称条件を与える境界条件の例(1/4モデルの例，薄墨部分)

b. ピンに与える境界条件

試験では、荷重制御または変位制御で実施されるが、解析では安定的に実施するためには変位制御で負荷することが望ましい。CT試験片では、ピンに変位または、荷重が付与される。代表例を以下に示す。ピンは高強度鋼で作成されるため、弾性体とすることが望ましい。

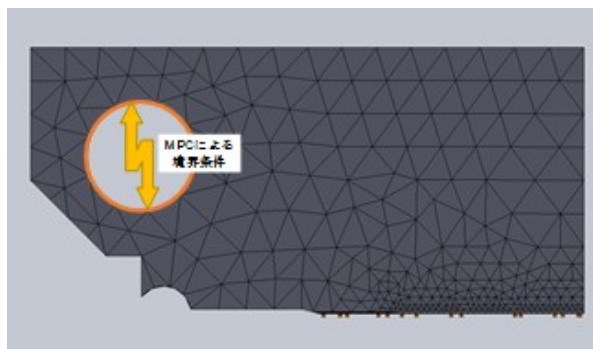


図2.2 ピンに与える境界条件
(その1)

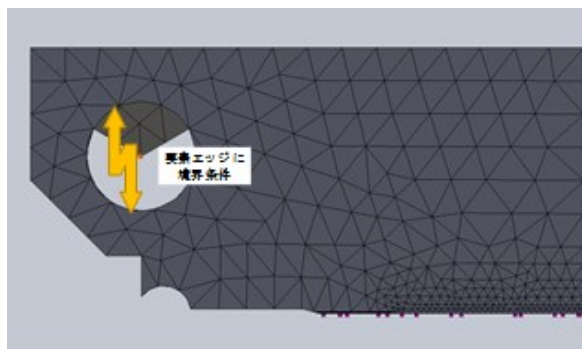


図2.3 ピンに与える境界条件
(その2)

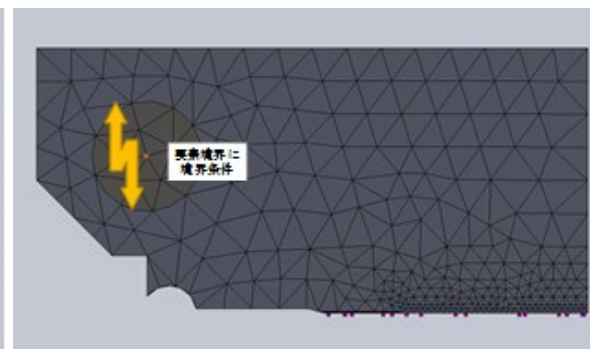


図2.4 ピンに与える境界条件
(その3)

2.1.2材料特性

(1) 実測応力-ひずみ特性

繰返し荷重下の応力-ひずみ特性を設定するため、試験では、単調増加荷重条件での応力-ひずみ特性を取得すると同時に、繰返し荷重下での応力-ひずみ特性も取得しておくこと。

(2) 複合硬化則

繰返し荷重下の亀裂進展挙動の評価には、非線形移動硬化モデル(Chabocheモデル等)と等方硬化則を組み合わせた複合硬化則が有効である。材料パラメータの決定には多くの場合試行錯誤が必要である。特に、ひずみ範囲が変化することにより材料パラメータが変化するため、より正確なジェネレーションフェーズ解析には複数の材料パラメータを決定する必要がある。

(3) 硬化則の材料パラメータ決定方法

以下のような方法を推奨する。

1) 3次元単軸引張モデルを用いた繰返し荷重下の応力-ひずみ関係による フィッティング

1 要素ないし数要素のモデルを用い、予め設定したサイクル数の範囲で実測値とフィッティングする。

2) 単調負荷条件におけるCT試験片の実測荷重-荷重線変位関係によるフィッ ティング

3) 繰返し負荷試験によるCT試験片の荷重-荷重線変位関係によるフィッティ ング

最初の2～3サイクルの荷重-荷重線変位関係を対象として複合硬化則のパラメータを決定する。

2.1.3 亀裂進展のクライテリア

有限要素法を用いた一般的な亀裂進展解析法として節点解放法がある。これは、実験から得られた亀裂進展量-荷重線変位関係に従い、付与した変位に対応した亀裂進展量だけ節点を解放する方法である。

損傷力学モデルでは、単調荷重負荷条件の破壊挙動評価においてはノッチ付丸棒の引張試験を実施し、ノッチ付試験片の荷重-ノッチ底径変化量の実測値に一致するよう損傷力学モデルのパラメータを決定するケースが多いが、繰返し負荷条件での亀裂進展挙動評価にこのような手法を適用した事例はまだない。今回のサンプル計算では、上記の一般的なFE解析と同様、実測の亀裂進展量-荷重線変位をクライテリアとして、所定の変位に対応する亀裂進展量となるよう、損傷力学モデルのパラメータを設定する手法がとられている。

粒子法でも同様の手法が採用されている。

2.2 解析結果の処理

2.2.1 出力データの種類, 出力点

亀裂進展解析の評価に必要なデータの種類の種類は, ピン荷重(反力), 荷重線変位, 境界条件を設定した節点での反力, 変位, 亀裂前縁部近傍の応力, ひずみ等であり, 必要に応じて選択する。試験結果との比較には, 荷重-荷重線変位における極大, 極小点におけるデータのほか, 曲線の全体の形も重要となるため, データ量を圧縮しすぎないように出力データの選択に留意すること。

2.2.2 ΔJ の評価

本ガイドラインでは、亀裂進展パラメータとして ΔJ を選定する。CT試験片の ΔJ は、荷重－荷重線変位曲線の面積とASTM1820-17の式により計算する。応力比が負の場合、圧縮荷重となるが、本ガイドでは、図2.5のA1を ΔJ の算出に用いる。

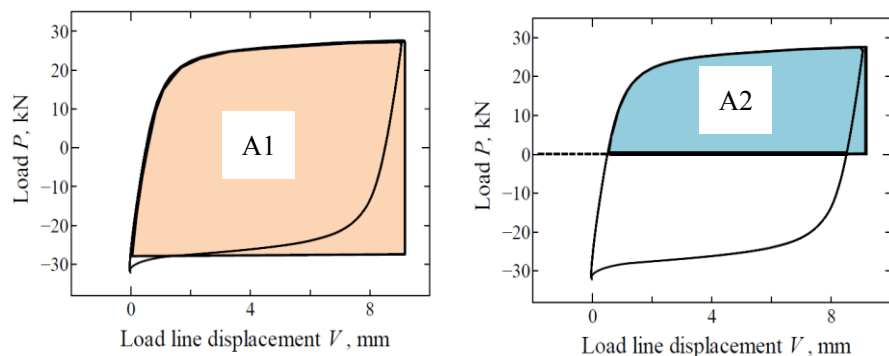


Fig 3.2.4.1-61 Schematic illustration of area A showing a used for J-integral range ΔJ 3.2.4.1-63 Schematic illustration of area A used for J-integral range ΔJ , where compression component was removed.

図 3.2.4.1-61 J 積分範囲 ΔJ に用いる面積 A の模式図

図 3.2.4.1-63 J 積分範囲 ΔJ に用いる圧縮側を除いた面積 A の模式図

図2.5 ΔJ 計算に使用する面積Aの取り方

3. 亀裂進展解析(Application phase)

3章では、荷重条件が与えられた時の、亀裂進展予測法のガイドを記述する。

3.1 亀裂進展解析のフロー

CT試験片の亀裂進展解析は以下の手順で実施すること。

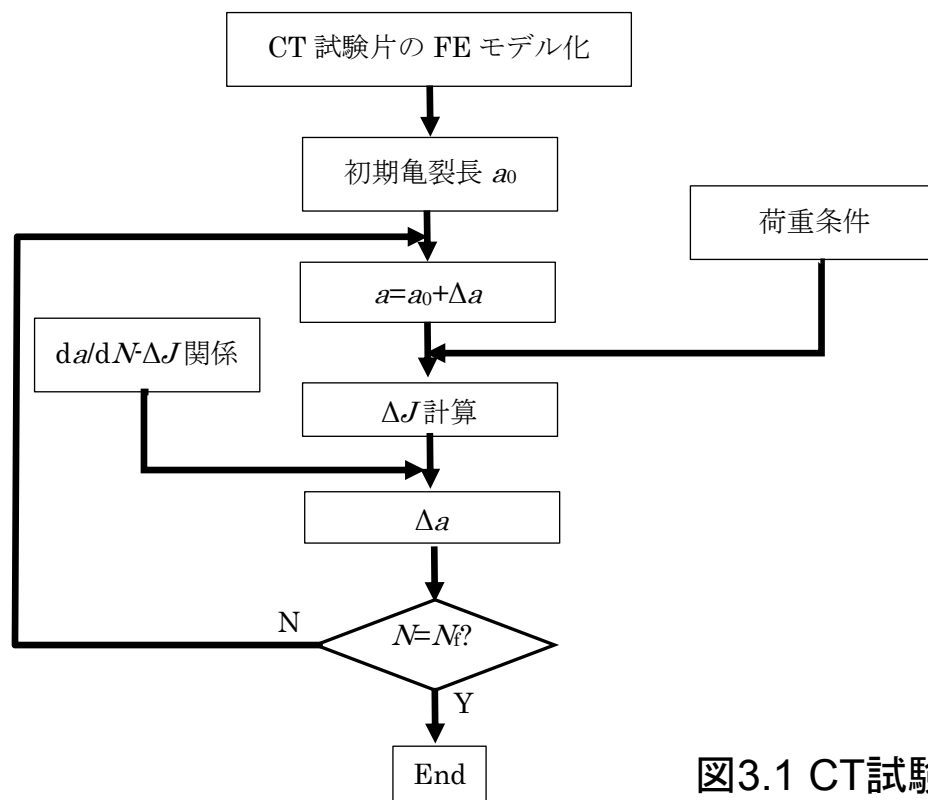


図3.1 CT試験片の亀裂進展解析フロー

3.2 亀裂進展則

フェライト鋼で大気中試験を実施した場合は、日本機械学会維持規格(2016年版)(1)添付E-2の疲労亀裂進展速度式を ΔJ ベースの進展速度式に変換して使用してもよい。変換した結果の式は以下で表される。

$$\frac{da}{dN} = 6.09 \times 10^{-9} \Delta J^{1.535} \quad (\text{m/cycle, kN/m}) \quad (3-1)$$

それ以外の鋼種、環境に対しては今後検討する。

参考文献

(1)発電用原子力設備規格維持規格(2016年版)JSME S NA1-2016, 日本機械学会, 2016年12月.

3.3 ΔJ 解析

J の計算法として参照応力法が適用できる。参照応力法による J 計算フローを図3.3-1に示す。試験片形状に依存する極限荷重 P_L を計算し、CT試験片に荷重 P が与えられた時の参照応力 σ_{ref} を計算する。応力-ひずみ曲線から σ_{ref} に相当するひずみ ε_{ref} を求める。応力ひずみ曲線には、評価者が妥当とする繰返し回数のもを使用すること。CT試験片の極限荷重式 P_L には図3.3-1に示した式以外に、平面ひずみ条件のTresca式が推奨される。

繰返し荷重条件での ΔJ 計算は、 J を片側振幅の荷重条件で上記の方法で計算し、これを4倍したものを ΔJ とする。

なお、サンプル問題では応力比 $R=-1$ の条件でのみ実施しており、他の応力比の条件での確認が不十分であるため、今後、評価事例を蓄積する。

図3.3-1 参照応力法による J 計算フロー

