

## 有限幅の厚板溶接継手の曲げによる疲労き裂進展挙動の解析

中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 (株) 正会員 山田 健太郎

### 1. 概要

破壊力学を用いた疲労き裂進展解析を用いると、例えば疲労試験が難しい厚板の疲労の特性を、種々の試験条件を与えてそれらの影響を予測でき、データを補完できる。ここでは板厚  $t=90\text{mm}$ 、幅  $w=50\text{mm}$  の部材にすみ肉溶接継手がある場合の疲労挙動を解析的に調べてみる。解析では、遊間の大きい厚板のフィンガージョイントの櫛の根元の断面に生じる疲労き裂 (図1) を対象に、応力集中や残留応力の分布を仮定して、引張だけでなく、着目部に引張片振り、両振り、圧縮片振りなどの曲げ応力を受ける場合の影響を考察した。

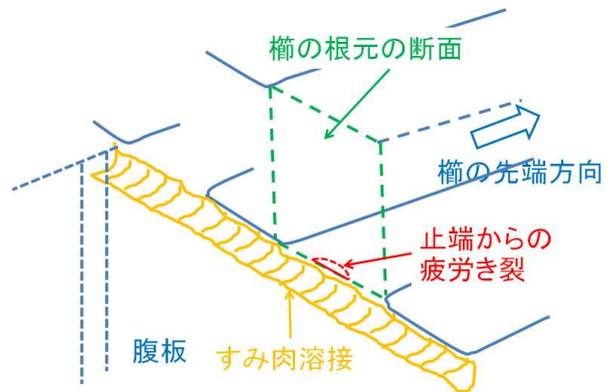


図1 フィンガージョイントの根元のモデル

### 2. 破壊力学を用いた疲労き裂進展解析の仮定について

#### 2.1 解析の基本的な考え方

破壊力学を用いた疲労き裂進展解析は、初期き裂長  $a_0$ 、最終き裂長  $a_f$  を仮定して、疲労き裂進展速度を積分して、疲労き裂進展寿命  $N_p$  を求める手法である。解析手法は文献1に示される方法によるが、解析を簡単にするために、いくつかの仮定を用いた。まず、応力拡大係数範囲  $\Delta K$  は、次式を用いる。

$$\Delta K = F_s \cdot F_e \cdot F_t \cdot F_g \cdot \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

ここで、 $a$  は、疲労き裂の大きさ、 $F_s$  は、表面き裂補正係数、 $F_e$  は、き裂形状補正係数、 $F_t$  は、板厚補正係数である。また、 $F_g$  は、応力集中補正係数であり、ここでは応力集中係数をき裂先端位置の  $\Delta \sigma$  に乗じる形とした。また、応力範囲のうち、疲労き裂の先端で引張側にある応力範囲のみが疲労き裂を進展させると仮定した。この仮定を用いると、例えば母材で残留応力がない場合、両振りでは、応力範囲の1/2だけが疲労き裂進展に寄与することになる。また、着目点に引張残留応力が存在する場合、作用応力が圧縮側であっても、引張残留応力により引張側になる応力範囲が疲労き裂進展に寄与することになる。

#### 2.2 解析の仮定

図2には、曲げを受けるすみ肉溶接継手の板厚方向の曲げ応力、応力集中、および残留応力の分布を示す。板厚方向の残留応力は、必ずしも明確にされていない。そこで、板厚の表面 (溶接側) で最大値となり、板厚方向に直線的に変化する分布を仮定する。板厚  $90\text{mm}$ 、幅  $50\text{mm}$  の断面では、引張残留応力は最大値  $200\text{MPa}$  とし、深さ  $20\text{mm}$  で0になる分布を仮定した。この仮定は、検証される必要があるが、仮定を変えることの影響をパラメトリックに評価することも可能である。

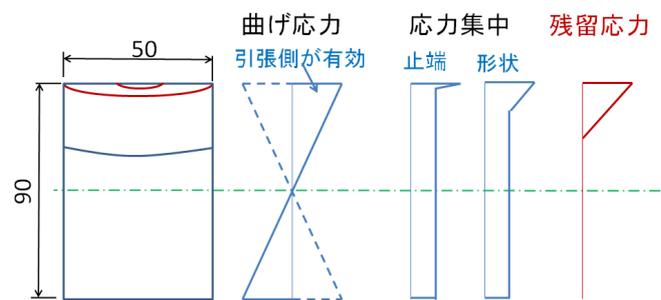


図2 曲げ応力と応力集中、残留応力分布の仮定

疲労き裂は、すみ肉溶接止端に初期き裂長  $a_0=0.2\text{mm}$  を仮定し、それが半だ円形き裂 (き裂形状  $a/b=0.2$ ) を保って進展する。き裂長が  $a=5\text{mm}$  になると、幅  $50\text{mm}$  に達して、その後は貫通き裂となる。また、そのき裂が進展するに従って、残存断面が小さくなるので、結果的に作用応力範囲が大きくなることも考慮した。

キーワード： 溶接継手、厚板、溶接止端、破壊力学、疲労き裂進展解析

連絡先 〒460-0003 名古屋市中区錦1-8-11 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 (株) TEL052-212-4577

### 3. 有限幅の厚板の疲労き裂進展挙動

#### 3.1 応力比の違いによる疲労き裂進展挙動

図3には、応力範囲  $\Delta\sigma=80\text{MPa}$  で、引張と曲げが作用する場合に、最終き裂長  $a_f=30\text{mm}$  (板厚  $90\text{mm}$  の  $1/3$ ) までのき裂進展挙動を示した。まず、断面に引張が作用する場合、最初は他の条件と似た挙動となるが、き裂が  $10\text{mm}$  程度からは、加速度的に早く進展することがわかる。

これに比べて、両振りの曲げで引張残留応力がある場合、その影響を受ける範囲 (ここでの仮定では、約  $20\text{mm}$ ) までは順調に進展するが、その後は進展速度が遅くなる。また、残留応力がなくて両振りの曲げの場合は、疲労き裂進展に寄与する応力範囲が  $1/2$  になるため、疲労き裂進展は極端に遅くなる。その場合、疲労き裂を進展させるためには、大きな応力範囲が必要となる。

フィンガージョイントの根元の着目点 (溶接部) には、通常、圧縮片振りの応力が繰返し作用する。この場合、残留応力の影響で疲労き裂は進展するが、引張残留応力が大きい領域 (図3では、約  $10\text{mm}$ ) を過ぎると、疲労き裂進展が遅くなる結果が得られた。

図4には、疲労き裂進展寿命の S-N 曲線を示す。ここでの解析では、引張の残留応力  $200\text{MPa}$ 、深さ  $20\text{mm}$  を仮定しているが、引張の場合に比べて、引張片振りの曲げと両振りの曲げが作用すると、1ランク程度ずつ長い疲労き裂進展寿命が得られた。残留応力の大きさと深さが小さい場合には、この差はより大きくなる。

これらの解析結果は、(1)板厚の大きい有限幅の部材の疲労き裂進展挙動が、破壊力学を用いた疲労き裂進展解析で予測できること、(2)部材が曲げを受ける場合、溶接による引張の残留応力の影響が大きいこと、および、(3)引張残留応力が存在する場合には、着目点に圧縮片振りの繰返し作用しても疲労き裂が進展すること、を示唆している。

#### 3.2 グラインダー仕上げ、ICR 処理、溶接補修の効果

疲労き裂が溶接止端から生じる場合、溶接形状に起因する応力集中を減らすために、グラインダー仕上げすることがある。疲労き裂進展の解析では、図2に示す応力集中を1とすることで、その効果を予測できる。また、溶接止端の疲労強度向上法として、止端部に高い圧縮残留応力を導入する ICR 処理やピーニングの効果も、仮定を置くことで解析できる。さらに、溶接止端に疲労き裂が生じたとき、それが溶接補修可能なら、疲労き裂をガウジングで除去して、再溶接した後に余盛を仕上げる補修も行われる。こういった場合には、溶接補修により生じる可能性のある溶接欠陥を仮定することで、その余寿命が計算できる。

### 4. まとめ

破壊力学を用いた疲労き裂進展解析を用いることで、厚板の溶接継手の疲労挙動を予測できる。ここでは、遊間の大きいフィンガージョイントの櫛の根元を想定して、幅  $50\text{mm}$ 、板厚  $90\text{mm}$  の断面の疲労き裂進展挙動を解析した。着目部に作用する曲げによる応力が、両振り、引張片振り、圧縮片振りの場合を比較した。また、疲労き裂の溶接補修や、ICR 処理による補修・補強、延命化についても解析できる。

**参考文献** 1) 日本鋼構造協会、鋼構造物の疲労設計指針・同解説、技報堂出版、2012。

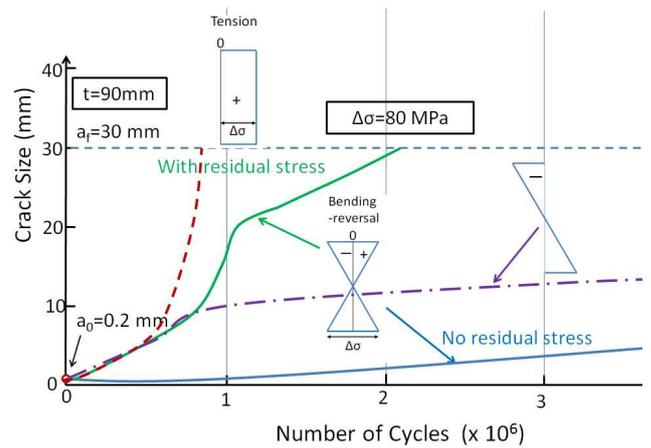


図3 疲労き裂の進展挙動の比較

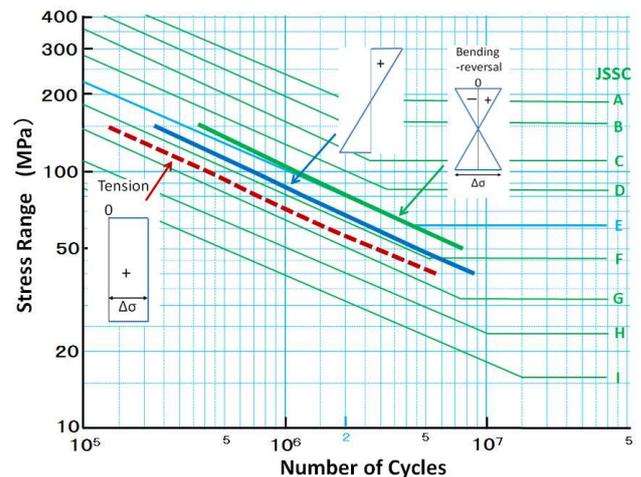


図4 疲労き裂進展寿命  $N_p$  の比較