

# 溶接ジョイントの疲労寿命評価ツール fe-safe<sup>TM</sup>/Verity<sup>®</sup>のご紹介

伊藤忠テクノソリューションズ(株) 津田 徹 窪田登志雄 坂井 哲也  
社納眞一郎 中嶋 亮平

## 1 はじめに

溶接継手の疲労寿命を予測する手法として、JSSCの疲労設計指針に基づき、溶接継手の形式や荷重モードごとに分類された疲労曲線と公称応力を用いる手法がある。また、公称応力が定義できないような複雑な構造継手に対しては、溶接のビード部近傍の母材の応力から外挿により求めるホットスポット応力が使用される。しかし、このホットスポット応力はFEMのメッシュに依存することが指摘されており、使用には注意が必要である。それに対し、局所的な応力集中を含まず、構造に起因して生じる構造応力が提案され、FEMのメッシュに依存しない手法として近年注目されている。

このような状況において、この構造応力を等価構造応力に発展させた手法が、米国のBattelle社によって開発され、英国のSafe Technology社の疲労寿命評価ツール fe-safe<sup>TM</sup>/Verity<sup>®</sup>として製品化された。この等価構造応力を用いれば、継手の形式、荷重形態、母材の板厚や材質などに関係なく、溶接継手の疲労寿命曲線を1本のマスターS-N線図だけで表わされる利点がある。次節以降で、この等価構造応力を用いた手法について、算出法や特徴および利点などについて紹介する。

## 2 fe-safeの概要

溶接部の疲労寿命の評価法を説明する前に、疲労寿命評価システム fe-safe の概要について説明する。fe-safe は、英国のSafe Technology社により開発された疲労評価システムであり、特徴として、処理速度が高速であること、先進の疲労評価手法を採用していること、使用法が非常に簡単であること、多機能であることなどが挙げられる。

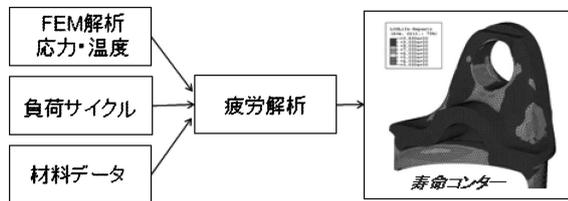


図1 fe-safeの概要図

図1に fe-safe の概要図を示す。fe-safe は、別途FEM解析で既に求められている応力、ひずみ、温度などの計算結果を読み込み、評価対象の構造機器に作用させる荷重の負荷サイクルを定義する。その後、評価対象のモデルの表面に fe-safe 内部の材料DB内の材料を設定し、疲労評価手法、材料の表面状態、残留応力の有無などを設定後、疲労解析を実行する。解析終了後、各節点で計算された寿命を用いて、寿命コンター図などを作画する。

疲労解析のアルゴリズムは、最新の研究成果により、適用する材料ごとにその材に最適なアルゴリズムが設定されており、例えば、延性材料ではひずみベースであるBrown-Miller法、脆性材料では主ひずみ基準が設定され

ている。なお、この疲労評価手法は変更することが可能で、ひずみベース手法の他に、応力ベース手法や他の手法も選択することが出来る。

次に、fe-safe 内部での多軸状態における疲労寿命解析の大まかな処理手順を示す。

- STEP 1 : 節点ごとの弾塑性応力・ひずみの算出
  - ノイバー則により算出
- STEP 2 : 材料DBの疲労評価曲線(疲労限)の補正
  - 温度、平均応力、荷重サイクルによる補正
- STEP 3 : クリティカル・プレーン法によるき裂発生方向の探索
- STEP 4 : 疲労寿命の計算
  - 各材料に最適な疲労評価式が適用される

## 3 構造応力の算出法

ここでは、fe-safe/Verityにおける構造応力の算出法について説明する。構造応力法は、図2に示す溶接止端部のような疲労破壊が発生し易い場所の応力集中を解析するために使用される。

先ず、図2に示すように、溶接止端部における板厚内の応力分布(a)は、平衡一相当応力状態(b)と自己平衡応力状態(c)によって、 $\sigma = \sigma_t + \Delta\sigma$ と表わされると仮定する。

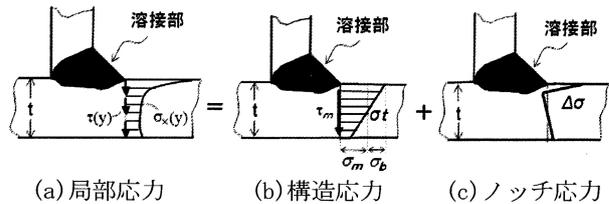


図2 溶接止端部の応力分布

ここで、(b)の構造応力は、破壊力学における等価遠方場応力に相当する応力状態または同じ場所での一般的な公称応力を表わす。一方(c)のノッチ応力は、溶接止端部に微小なき裂の存在を想定した場合、ノッチ効果に起因する自己平衡応力と呼ばれるき裂面に生じる表面力である。

次に、変位に基づく有限要素法において、各要素の節点力とモーメントは各節点位置で自動的に釣合合う。従って、平衡-相当構造応力(構造応力)を膜成分と曲げ成分の形で表わすことで、着目位置での節点力とモーメントを用いて計算することが出来る。

式(1)に構造応力  $\sigma_s$  の計算式を示す。

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b = \frac{f_y'}{t} + \frac{6m_x'}{t^2} \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_m$  は膜応力、 $\sigma_b$  は曲げ応力、 $t$  は母材の板厚、 $f_y'$  と  $m_x'$  は溶接止端部に沿った局所系(図3参照)におけるラインフォースとラインモーメントである。

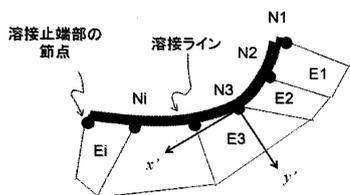


図3 溶接止端部のラインフォース

このラインフォースは、シェル/プレート要素の場合、式(2)のマトリックスを解いて求められる。

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{l_1}{3} & \frac{l_1}{6} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{l_1}{6} & \frac{l_1+l_2}{3} & \frac{l_2}{6} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{l_2}{6} & \frac{l_2+l_3}{3} & \frac{l_3}{6} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{l_n}{3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_n \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 $F_i$ は溶接止端部上の節点*i*の局所系*y'*方向の節点力、 $l_i$ は要素*E<sub>i</sub>*の辺長、 $f_i$ は溶接止端部に沿った局所系*y'*方向のラインフォースである。なお、ラインモーメントも式(2)と同様な手法で求めることができる。

このように求められた構造応力は、FEM解析で得られた着目点の節点力から求められるため、応力やひずみと異なりメッシュの依存性が低いことが特徴である。

#### 4 等価構造応力とマスター-S-N線図

##### 4.1 等価構造応力の算出

図2に示した応力分布について、遠方場応力の応力拡大係数  $K_n(\sigma_t)$  およびノッチ応力による応力拡大係数  $K_s(\Delta\sigma)$  とき裂長さ  $a$  の関係を無次元化すると図4のような分布となる。

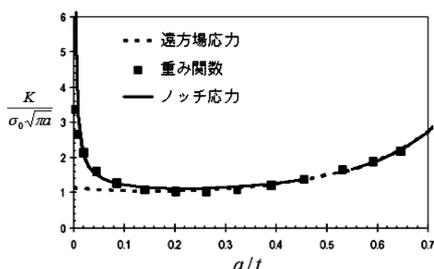


図4 応力拡大係数とき裂長さの関係

ここで、この構造応力における応力拡大係数とノッチ応力における応力拡大係数の比を応力拡大係数の倍率係数として、 $M_{kn} = K_s(\Delta\sigma)/K_n(\sigma_t)$  と定義する。

次に、この  $M_{kn}$  をパリス則に導入すると式(3)となる。

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (M_{kn})^n \cdot (\Delta K_n)^m \quad (3)$$

ここで、式(3)は修正パリス則と呼び、 $C$ は材料定数、 $m$ はパリス指数、 $n$ は短いき裂成長速度と長いき裂成長を統合するもので2と設定される。また、遠方場応力拡大係数は、構造応力を用いて次式で表わされる。

$$\Delta K_n = \sqrt{t} \cdot \Delta\sigma_s \cdot [f_m(a/t) - r(f_m(a/t) - f_b(a/t))] \quad (4)$$

ここで、 $f$ はコンプライアンス関数、 $r$ は荷重比であり、 $r = \sigma_b/(\sigma_m + \sigma_b) = \sigma_b/\sigma_s$  と表わされる。

式(3)をき裂長さ  $a$  で積分し、式(4)を考慮すると、最終破壊に至る寿命は次式で求められる。

$$N = \int_{a/t=0}^{a/t=1} \frac{t \cdot d(a/t)}{C \cdot (M_{kn})^n \cdot (\Delta K_n)^m} = \frac{1}{C} \cdot t^{1-m} \cdot (\Delta\sigma_s)^{-m} \cdot I(r) \quad (5)$$

上式を整理すると、

$$\Delta\sigma_s = C \cdot \frac{1}{m} \cdot t^{2-m} \cdot I(r)^{\frac{1}{m}} \cdot N^{-\frac{1}{m}} \quad (6)$$

ここで、 $\Delta S_s$ を等価構造応力と呼び、 $\Delta S_s = C \cdot \frac{1}{m} \cdot N^{-\frac{1}{m}}$ と置き、上式を整理すると、最終的に、等価構造応力は次式から求めることができる。

$$\Delta S_s = \frac{\Delta\sigma_s}{t^{2-m} \cdot I(r)^{\frac{1}{m}}} \quad (7)$$

ここで、 $I(r)$ は荷重比  $r$  の無次元関数であり、次式で表わされる。

$$I(r) = \int_{a/t=0}^{a/t=1} \frac{d(a/t)}{(M_{kn})^n \cdot [f_m(a/t) - r(f_m(a/t) - f_b(a/t))]^m} \quad (8)$$

##### 4.2 マスター-S-N線図

図5は、継手タイプ、荷重モード、母材の板厚が異なる様々な試験タイプの疲労試験結果を、公称応力範囲で整理したものである。これより、公称応力で整理した場合、S-N線図のパラッキが大きいのが判る。

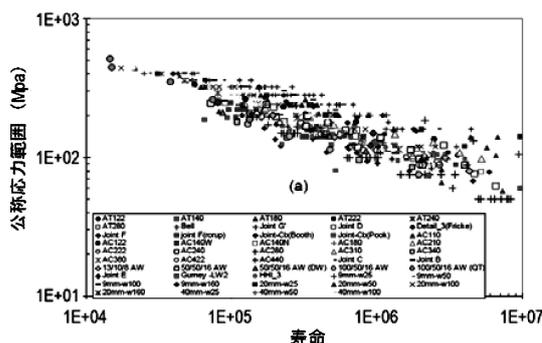


図5 構造応力範囲によるS-N線図

一方、図6は、同じ試験結果を、式(7)で示される等価構造応力で整理したものであり、S-N線図のバンド幅が図5より狭くなっていることが判る。これより、この等価構造応力を用いれば、継手の形式、荷重形態、母材の板厚や材質などに関係なく、溶接継手の疲労寿命を1本のマスター-S-N線図だけで評価できる。なお、これは800を越す材料試験によって検証されている。

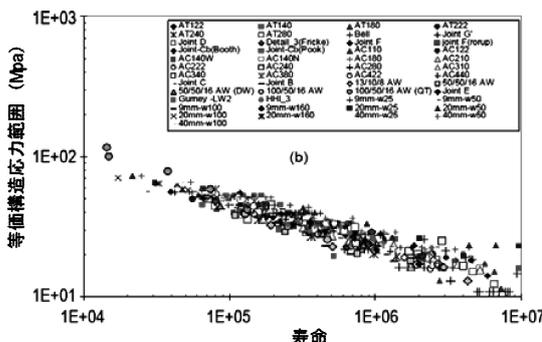


図6 等価構造応力範囲によるマスター-S-N線図

[連絡先] 伊藤忠テクノソリューションズ(株)  
 東京：東京都千代田区霞が関3-2-5、 ☎ 03-6203-7344  
 大阪：大阪市北区梅田3-1-3 ☎ 06-6439-8280  
 E-mail: fe-safe@ctc-g.co.jp  
 http://www.engineering-eye.com/