

鋼の破壊靭性のばらつきの確率的分析

Probabilistic analysis for Scatter of Cleavage Toughness in steel

学籍番号 03110890 吉津 周平
指導教員 栗飯原 周二

(平成 25 年 2 月 6 日提出)

Keywords: 破壊力学, 脆性破壊, ワイブル応力, 韧性のばらつき, 破壊起点

1. 序論

鋼の破壊形態の一つである脆性破壊は、一度発生すると構造物全体に致命的な破壊を引き起こすため、その発生靭性の評価が必要である。鉄鋼材料は無数のマイクロ欠陥を含むが、そのうちの一つでも脆性破壊発生基準を満たすと、そこを起点に全体的な脆性破壊に至る。つまり、脆性破壊の発生は最弱リンク的な現象である。マイクロ欠陥の大小は分布するから、発生靭性は本質的にばらつく。現在に至るまで、ワイブル応力を用いて、この発生靭性のばらつきを評価する研究が行われてきた。しかし、ワイブル応力の形状母数および尺度母数を決定できない場合も多く、不完全性が指摘されている[1]。そこで、本研究ではこの形状母数及び尺度母数を一意に定めるための新たな評価方法確立を目的とする。

2. 理論

2. 1. 体積要素と破壊応力の分布

き裂先端近傍の領域を体積要素に分割し、各々に破壊応力の分布に基づいて破壊応力を割り振る。最弱リンク説では、各体積要素において破壊応力と応力を比較し、応力の方が大きければ、その構造物全体が破壊するとみなす。また、破壊靭性は材質のみに依存するため、応力場と限界破壊応力の分布が分かれれば、どのような形状の物体でも、任意の形状および条件で破壊する確率を求めることができる。

負荷応力が σ の時の試験片の累積破壊確率は以下の通り与えられる。

$$F(\sigma) = 1 - \text{Exp} \left[- \left(\frac{\sigma}{b_0} \right)^{m_0} \right] \quad (1)$$

(m_0 : 形状母数, b_0 : 尺度母数)

2. 2. ワイブル応力

現状最有力な理論式である、ワイブル応力の式は以下のように定義されている[2]。

$$\sigma_w = \left\{ \sum_{i=1}^n \sigma_i^{m_i} \frac{V_i}{V_0} \right\}^{\frac{1}{m}} \quad (2)$$

2. 3. ワイブル応力の問題点

破壊応力の形状母数を 20 と仮定して、FEM によりシミュレーションすると、破壊時の応力場が計算できるので、ワイブル応力 σ_w が算出され、破壊応力の形状母数を推定することができる。繰り返しシミュレーションした結果、3割程度しか仮定した形状母数と一致しない・この不完全性がワイブル応力の問題と言われている[2]。

3. 実験

3. 1. 引張試験

使用鋼の材料特性を知るために引張試験を実施した。

3. 2. CTOD 試験

50 本の CTOD 試験を行った。いくつかの温度で CTOD の値を算出し、CTOD 値が適当な範囲となる-130°C で 26 本の同一条件での繰り返し実験を行った。その後、得られた CTOD の値をワイブル分布に適用し、実験 CTOD 値のワイブル分布の 2 母数 m_δ および b_δ を求めた。

3. 3. SEM による起点観察

SEM を用いて、使用試験片を観察し脆性破壊起点を特定した。

4. モデル構築

FEM を用いて応力場を解析し、各時刻における CTOD 値と各体積要素の応力や変位を求めた。

(1)式に基づき、 m_0 , b_0 を仮定し、その条件で 40 本の CTOD 試験のシミュレーションを行い、CTOD および破壊起点の破壊進展方向の長さ X の分布を得た。CTOD の分布が実験の結果に最も合う値を探した結果、 $m_0 = 25$, $b_0 = 2400 \text{ MPa}$ となった。また、CTOD 値の解析結果が妥当と判定したデータを用いて、以下で関係式を構築した。

- ① A 法; m_δ , b_δ から m_0 , b_0 を推測する方法
 F_σ , b_δ の関係及び m_δ , b_0 の関係を近似し, (3), (4)の関係式を得た. これと(1)を用いて m_0 , b_0 を推定する.
- ② B 法; $\frac{X}{CTOD}$, b_δ から m_0 , b_0 を推測する方法
 $\frac{X}{CTOD}$ の中央値を用いる. $\frac{X}{CTOD}$ と m_0 , b_0 の関係を近似し, (5)の関係式を得た. これと(1), (3)を用いて m_0 , b_0 を推定する.

$$\begin{aligned} \log[b_\delta] &= -0.0414 * (\log[F_\sigma])^2 - 1.42 \\ &\quad * \log[F_\sigma] - 13.87 \end{aligned} \quad (3)$$

$$m_\delta = 257070 * (b_0 - 1500 * 10^6)^{-0.5817} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \log\left[\frac{X}{CTOD}\right] &= 2.91 * (\log[m_0])^2 \\ &\quad - 24.9 * \log[m_0] - 11.3 * \log\left[\frac{b_0}{\sigma_0}\right] + 68.58 \end{aligned} \quad (5)$$

但し, σ_0 は降伏応力で本試験片では 511MPa である.

5. モデルの妥当性検証

26 本の実験結果を真として, この 26 本のうちの何本かを抽出して, CTOD 試験のデータセットとして m_0 を求めるシミュレーションを 40 回行う. なお, 抽出本数を 26, 24, 12, 6, 3 本とする. この時の推定 m_0 の値は右図の通りとなる.

Valid: 妥当な範囲は $0.7 * 25 \leq m_0 \leq 1.3 * 25$

Error: エラー値の範囲は以下の範囲であり, 処理上 10 または 50 としてグラフ上に載せている

$m_0 < 10$ or $m_0 > 50$ or m_0 can't calculated

結果

① A 法; m_δ , b_δ から m_0 , b_0 を推測する方法
サンプル数が多いと妥当な値に収束するが, サンプル数が減ると急激に精度が落ちるため, 予測にはある程度以上のサンプル数を必要である.

② B 法; $\frac{X}{CTOD}$, b_δ から m_0 , b_0 を推測する方法
異常値は多いが, サンプル数が少ない方が良い結果が出たことから, 本質的にサンプル数による影響は少ないと考えられる.

③ ワイブル応力

m_0 が妥当な範囲内に入る割合が, 多くても 3 割であり今回の実験には適さない.

6. 結論と課題

ワイブル応力に代わる破壊応力の分布の求めようと試みた.

A 法, B 法とともにワイブル応力よりも妥当な範囲に入ったものが多く, 比較的有効である. A 法はサンプル数が少ない時のばらつきが多く, B 法はエラー値が出やすい.

6. 2. 課題

今後は以下の検討が必要と考える

- 同一材料, 試験片形状の異なる試験片での実験・シミュレーションを実施する.
- A 法, B 法とともに, 予測の精度をあげるべく, 精度のよい新たな近似式を構築し, 検討する必要がある.

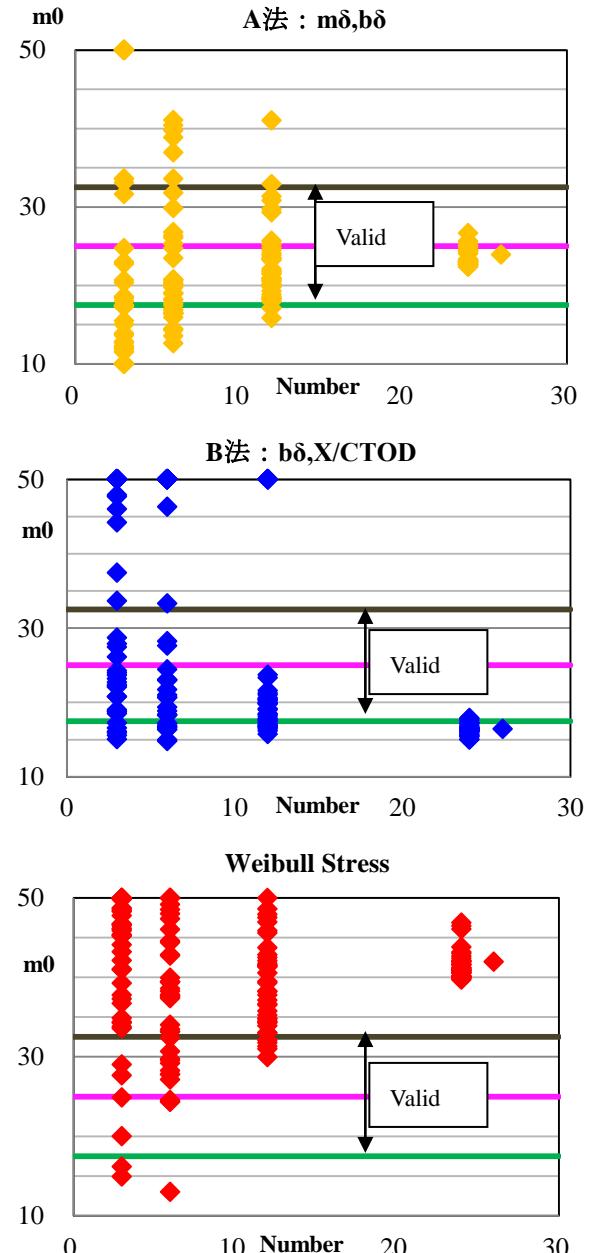


Fig result of assuming m_0 by each way

参考文献

- [1]田川哲哉, 富永英嗣: 日本鉄鋼協会 材料の組織と特性部会 「構造材料の破壊特性のばらつきと組織」 フォーラム シンポジウム「構造材料のミクロ組織と破壊特性」 p1-5
- [2]Weibull,W.: "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability", Journal of Applied Mechanics, Vol.18, 1953, pp.293-297
(Scanning Electron Microscope: 走査型電子顕微鏡)