

# PS-12 表面亀裂を有する構造物の脆性破壊強度評価

構造基盤技術系 \* 小沢 匠, 吉成 仁志

## 1. 諸 言

脆性破壊はFEM解析で予防できる座屈や変形と比べ予測が難しく、疲労亀裂と異なり突発的に発生するため予防が困難である。さらに、頻度は少ないものの、脆性破壊事故の被害は甚大であり、船舶関係者にとって最も不安な要素の一つとして挙げられる。

近年、経済性とCO2削減の観点から大型化が進んでいるコンテナ船は一部鋼板の厚さが80mmを超える厚手化の傾向<sup>1)</sup>にある。またLNG輸送ニーズの拡大やメタンハイドレートなどの低温物質の輸送さらに北極海航路や氷海ガス田開発による氷海域での船舶や海洋構造物の使用が拡大している。脆性破壊が厚板、低温側で発生しやすいことを考慮すれば、近年の動向は脆性破壊のリスクを高めているといえ今まで確認されていなかった脆性破壊事故が生じる可能性がある。

わが国の現行の破壊評価基準である日本溶接協会(JWES)規格WES2805<sup>2)</sup>は、英国が定めたPD6493<sup>3)</sup>の流れをくみ、破壊強度評価法としてCTOD設計曲線が用いられている。そして溶接鋼構造物の脆性破壊に対する欠陥の評価方法として1976年に制定され、数度の改定を経て今日も広く活用されている。

PD6493は海洋構造物に生じた亀裂による破壊判定を目的に1980年に制定され、当初はあくまで基準ではなくガイダンスとして運用されていた。また、同時期に英国で破壊評価基準としてCEGB-R6<sup>4)</sup>が制定されているが、こちらは原子力産業を対象としており、破壊強度評価法として破壊評価線図(FAD: Fracture Assessment Diagram)を用いている。PD6493とCEGB-R6は別の分野で互いに発展していったが、両社とも基本的には同じ問題を対象としていたため、PD6493は1991年の改定の際にFADを採用した。そののち、いくつかの変更を行い、PD6493はBS7910<sup>5)</sup>としてガイダンスから英国指針となり、現在運用されている。

現行の破壊強度評価法の流れではFADの考え方がグローバルスタンダードとなっており、CTOD設計曲線を用いているのはWES2805を含めわずかである。そのため、WES2805でもFADの考え方を採用することが国際的に求められているが、現行の荷重、応力拡大係数をパラメータとしたFADは危険側の評価を行わないよう設計されたため、過度に安全側の評価を行う問題は無視できない<sup>6)</sup>。破壊評価を高精度に行うことは、効率的な構造物の運用において不可欠である。

そこで本研究ではCTOD設計曲線とFADの両者の長所を生かした新しい破壊強度評価法としてCTOD-FADを提案した。これはパラメータとして局所ひずみとCTODを用いたFADであり、高精度かつ実用性の高い破壊強度評価法としての運用が期待できる。本稿では表面亀裂の強度評価としてCTOD-FADを解析的、実験的に検討を行った。

## 2. 貫通亀裂に対する評価方法

貫通亀裂に対するCTOD-FADの評価方法は、ひずみ、CTODをベースとしたパラメータからFAD上の座標を求め、破壊評価線図(FAC: Fracture Assessment Curve)と比較することにより行う。縦軸である $\sqrt{\delta_r}$ は以下の式で示される。

$$\sqrt{\delta_r} = \sqrt{\delta_e / \delta_c} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $\delta_c$ は材料特性である限界CTODであり、WES1108などによって規定されているCTOD試験より求める。 $\delta_e$ はCTODの弾性成分であり、以下の式より求める。

$$\delta_e = \frac{K^2(1-\nu^2)}{mE\sigma_Y} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、Eはヤング率、 $\nu$ はポアソン比であり、鋼材の場合はそれぞれ209GPaおよび0.3の値を使用する。 $\sigma_Y$ は降伏応力であり、引張試験により求める材料特性である。Kは応力拡大係数であり、事前に行ったFEM解析の結果を用いる。また、mは改定中のWES1108で用いるCTODの弾性項換算係数<sup>7)</sup>である。横軸である $L_r'$ は以下の式で示される。

$$L_r' = \left( \frac{\epsilon_A}{\epsilon_Y} \right) \left( \frac{\epsilon_R}{\epsilon_M} \right) \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $\epsilon_R$ は実断面平均ひずみ、 $\epsilon_A$ は仮想亀裂上の面積平均ひずみ、 $\epsilon_M$ は仮想亀裂上の最大ひずみである。ここで、仮想亀裂上とは、亀裂が存在しない場合のモデルにおける、本来亀裂が存在する箇所を示す。また、 $\epsilon_Y$ は塑性ひずみであり、 $\epsilon_Y = \sigma_Y / E$ である。

貫通亀裂を有した構造モデルの破壊試験を行った。図-1に脆性破壊試験の破壊点とFACの比較を記載する。図-1に示すように、FACが脆性破壊試験の破壊点を比較的高精度に予測できている。

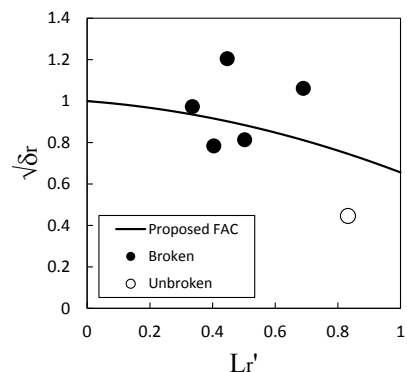


図-1 貫通亀裂を有した構造モデルにおける脆性破壊試験の破壊点とFACの比較

### 3. 表面亀裂に対する評価方法

表面亀裂を有した構造の評価において、前章にて提案した CTOD-FAD をそのまま用いることはできない。表面亀裂は亀裂前縁に沿って応力拡大係数のばらつきが大きい上に、式(2)で用いた CTOD の弾性項換算係数  $m$  が貫通亀裂の実験結果から求めたものであるためである。そのため、表面亀裂に対する評価方法として、等価貫通欠陥寸法の考え方をを用いる。等価貫通欠陥寸法とは、ある表面亀裂に対して、その亀裂のサイズと等価なダメージを構造に与える貫通欠陥があると仮定するものであり、複雑な表面亀裂の問題を比較的単純な貫通亀裂の問題に置き換えることができるという長所がある。

等価貫通欠陥寸法の計算には、応力集中部の存在しない構造に、楕円に置き換えた表面亀裂を設けた際の最大の応力拡大係数を求め、その応力拡大係数と等しくなるような貫通欠陥を求めることにより行う。例えば、比較的幅が広く、浅い表面亀裂は亀裂の最深部にて応力拡大係数が最大となる傾向にあり、比較的幅が狭く、深い表面亀裂は亀裂の表面部にて応力拡大係数が最大となる傾向にある。

以上のように等価貫通欠陥寸法を求め、その貫通欠陥における局所ひずみ、応力拡大係数などから CTOD-FAD の縦軸、横軸を式(1)から(3)より求める。図-2 は表面亀裂を有した構造モデルにおける脆性破壊試験の破壊点を示したものである。T-2 の試験片の結果を除き、多くの破壊点が FAC 付近にプロットされ、表面欠陥を有した構造モデルにおいても CTOD-FAD が比較的高精度に評価が行えることが判明した。

外れた一点において、走査型電子顕微鏡(SEM)による破面観察を行った。破面の画像の一例を図-3 に示す。破面観察の結果から、脆性破壊の起点と思われるリバーパターン(図-4 参照)が、限界 CTOD のばらつきなどの原因により、事前計算の予測とはずれ、応力拡大係数の低い箇所から発生している可能性がある。

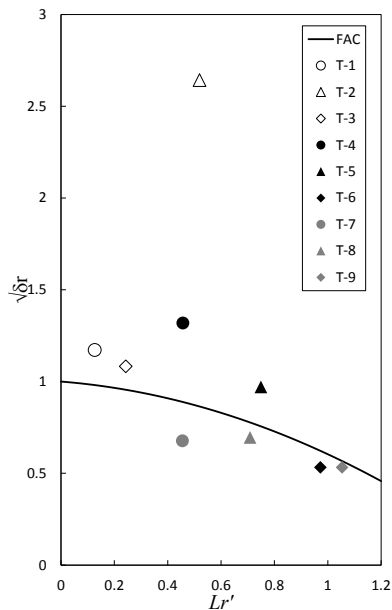


図-2 表面亀裂を有した構造モデルにおける脆性破壊試験の破壊点と FAC の比較

### 7. 結 言

表面亀裂に対して比較的高精度に評価が可能な CTOD-FAD において、等価貫通欠陥寸法の考え方をを用い、表面亀裂に対しても適用が可能なよう修正した。また、表面亀裂を有した構造モデルにおいて脆性破壊試験を行った結果、多くの試験片で比較的高精度に評価が行える事を確認した。また、唯一外れた試験片に関しては限界 CTOD 等の材料のばらつきにより、予測されていた起点と外れた事が原因と思われる。

今後は溶接残留応力における影響に関して調査・検討する予定である。

### 謝辞

本研究は、東京大学との共同研究により実施しました。関係各位に深く感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) 大型コンテナ船の構造安全対策の検討に関わる調査研究報告書, 日本船舶技術研究会, (2009).
- 2) 溶接継手のぜい性破壊発生及び疲労亀裂進展に対する欠陥評価方法(WES2805), 日本溶接協会, (2011).
- 3) I. Milne et al.: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defect, Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol. 32, (1988), pp. 3.
- 4) British Standard Inst. PD 6493: Guidance on Some Methods for the Derivation of Acceptance Levels for Defect in Fusion Welded Joints, (1980).
- 5) Guide to method for assessing the acceptability of flaws in metallic structures (BS 7910:2013), BSI, (2013).
- 6) Isabel Hadley, Mustafa Koçak, Overview of the European FITNET Fitness-for-Service Procedure, ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, (2008), pp. 447-445.
- 7) T. Tagawa et al., Proposal of a new CTOD calculation formula, Engineering Fracture Mechanics (to be published).

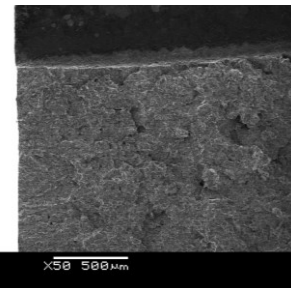


図-3 T-2 試験片における破面画像の一例

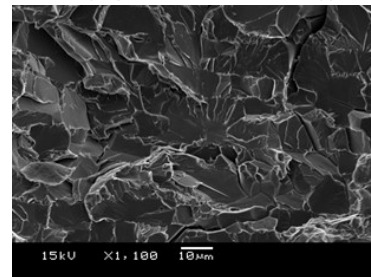


図-4 起点と思われるリバーパターン