CTOD 設計曲線における残留応力及び予荷重の影響の評価法に関する考察

正員 阪野 賢治* 正員 山下 洋一*

A study of an evaluation method of previous load effects on brittle fracture strength using CTOD design curve

by Kenji Sakano, Member Youichi Yamashita, Member

Summary

The CTOD design curve of WES 2805-1997 is widely used for the flaw evaluation from fitness for purpose view points. In the design curve, welding residual stresses are treated as constant magnitude strains or CTODs, therefore residual stress effects on brittle fracture strength are overestimated in low fracture toughness regions. In this study, evaluation methods of effect of previous loads, such as welding residual stress and preload by proof test etc., on the brittle fracture strength are investigated and a modification of the CTOD design curve method is proposed. It is confirmed that residual stress effects on brittle fracture strength in a low fracture toughness region are fairly well estimated using a proposed method by comparing estimated brittle fracture strength with experimental one.

1. 緒 言

ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. XI, Appendix A を始めとする、欠陥を有する構造物の脆性破壊強度を合目的性の観点から評価する基準¹⁻³⁾が制定されてから久しく、その後、この種基準の改定及び新たな制定がなされてきた⁴⁻⁹⁾。

これら評価基準は破壊力学的な手法に基づいており、破壊強度を定量的に評価できる。しかし、使い勝手を考え大幅な簡略化がなされており、精度が犠牲になっている面もある。また、評価法に取り入れられていない事項もある。

WES 2805-1997⁴⁾について見ると、溶接残留応力の影響は一定の歪を加えることで評価される。このため、低温あるいは高歪速度負荷により破壊靱性値が低下した状況においては、破壊靱性値である限界 CTOD のほとんどが残留応力による CTOD で占められることになり、破壊強度を実際よりも低く評価する傾向が強くなる。また、評価基準への取込みが望まれる事項としては、予荷重効果、溶接ミ

スマッチの影響、材料の降伏比の影響等がある。さらに、評価基準の適用範囲との関連で、大変形あるいは塑性崩壊の取扱いをどうするかという議論もある。

本報告においては、WES 2805-1997 の CTOD 設計曲線の手法を踏襲することにして、溶接残留応力の影響をより精度よく評価する方法、及び予荷重の効果を評価する方法を提案する。また、提案した方法によれば、予荷重を受けた試験片及び溶接残留応力を有する試験片の脆性破壊強度をより精度よく評価できることを示す。

2 WES 2805-1997 の脆性破壊発生強度評価法の概要と課題

2.1 WES 2805-1997 の概要

脆性破壊発生条件は、亀裂先端開口変位 (CTOD) を δ 、破壊靱性値 (限界 CTOD) を δ_c として、次で与えられる。

$$\delta \geq \delta_c \quad (1)$$

δ は、亀裂特性寸法 $\bar{a}$ 及び亀裂が無い状態における亀裂部の平均ひずみ ε より、次式で算定される。

$$\delta = \varepsilon_y \bar{a} (\pi/2) (\varepsilon/\varepsilon_y)^2 \quad \varepsilon/\varepsilon_y \leq 1.0 \quad (2.1)$$

$$\delta = \varepsilon_y \bar{a} (\pi/8) \{9(\varepsilon/\varepsilon_y) - 5\} \quad \varepsilon/\varepsilon_y > 1.0 \quad (2.2)$$

ここで、 $\varepsilon_y = \sigma_y/E$: 降伏ひずみ

σ_y : 降伏点

* 石川島播磨重工業(株) 基盤技術研究所

を、外力による歪 ε_1 に一律に加えることにより、残留応力の影響を評価することになっている。残留応力による影響を外力のレベルに関係なく一定としているため、結果としては Active CTOD 概念から離れたものとなっている。Fig. 2 において見ると、曲線 1-2 を水平移動させ、点 1 を縦軸上まで持ってきた曲線 3-4 が、残留応力がある場合の CTOD 評価曲線となる。

Fig. 2 を用いて、残留応力がある場合の破壊強度を、Active CTOD 概念と WES 2805-1997 の方法により評価すると、次の特徴があることが分かる。

- ・ WES 2805-1997 の方法による破壊強度の方が低く、強度差は δ_c が δ_r に近いほど大きい (図中の①, ②参照)。
- ・ WES 2805-1997 による破壊強度は、 δ_r が δ_c 以下の場合、0 となる。

このため、運用時にほとんど荷重が作用しない部材であっても、低温あるいは高速度負荷により破壊靱性値が低下する状況においては、残留応力が存在することにより、必要以上の破壊靱性値を要求される可能性があることになる。

一方、Active CTOD 概念のように、運用前に生じる CTOD は破壊に全く寄与しないとして取り扱ってよいかとの疑問もある。

3 供用前荷重の影響の評価法に関する検討

残留応力及び予荷重 (耐圧試験のように運用時と同種の荷重を運用前に作用させる荷重) を総称して供用前荷重と呼ぶこととし、供用前荷重が脆性破壊発生強度に及ぼす影響の評価法について検討する。検討は、破壊靱性値への影響と CTOD への影響の 2 つについて行う。

3.1 供用前荷重が限界 CTOD に及ぼす影響

3.1.1 予荷重材の限界 CTOD

構造物が予荷重を受けると、より低い温度域での脆性破

壊強度が改善されることが知られている (例えば¹²⁾)。しかし、予荷重が限界 CTOD に及ぼす影響を調べた実験によれば、限界 CTOD そのものは予荷重により減少し、Active CTOD 概念が成り立たない結果が得られている^{13~16)}。この傾向を破面様相との関係で詳細に検討し、大塚ら¹⁴⁾及び三村ら¹⁵⁾は次の知見を得ている。

- 破壊時の COD がほとんど弾性 COD である場合は、限界 CTOD は予荷重の大きさの影響を余り受けない。
- Stretched zone を生じてから破壊する場合は、予荷重材の限界 CTOD は予荷重により生じた塑性 CTOD (Stretched zone) の分だけ減少する。
- Stretched zone の最大値を過ぎ、剪断亀裂が発生するほどの大きい予荷重を受けても、限界 CTOD は 0 とならず多少の値を有する。
- 剪断亀裂発生時 (Stretched zone が最大となる時) の CTOD は試験温度に関係なくほぼ一定である。

以上からすると、予荷重材の限界 CTOD δ_{ac} は次式によりほぼ安全側に評価されると想定される。

$$\delta_{ac} = \left(1 - \frac{\delta_p}{\delta_i}\right) \delta_c \quad (5)$$

ここで、 δ_p : 予荷重による CTOD

δ_i : 剪断亀裂発生時の CTOD

δ_c : 供用温度における予荷重なしの限界 CTOD

酒井ら¹³⁾及び山下ら¹⁶⁾の実験結果を (5) 式による推定値と比較した結果を Fig. 3 に示す。酒井らの実験の切欠は 0.2 mm 幅の機械加工であることから、大塚らの結果¹⁴⁾を参考に、 δ_i を 0.5 mm とした。山下らの実験結果の評価においては、 δ_i としては実測値 0.3 mm を使い、 δ_c としては 50% 破壊確率時の CTOD を使用した。(5) 式は実験値のほぼ下限を与えており、予荷重による CTOD が大きくなるに従い実際よりも小さく評価する傾向にある。これは、(5) 式において、上記 a 項及び c 項を考慮に入れ

(a) Deep notch test data by Sakai et al.¹³⁾

(b) CTDO test data by Yamashita et al.¹⁶⁾

Fig. 3 The effect of preload on critical CTOD by experiments and that by estimation equation

ていないことの影響と考えられる。

3.1.2 溶接残留応力場に存在する欠陥の限界CTOD

溶接残留応力場に存在する欠陥については、残留応力の発生時期と欠陥の発生・成長の時期との関係で、限界CTODへの影響が異なってくることが予想される。両者の時期的関係としては、次が考えられる。

- 既に存在する欠陥が溶接による熱ひずみと残留応力を受ける。(欠陥の近くを溶接する場合)
- 既に存在する欠陥が溶接による残留応力のみを受ける。(欠陥から離れた箇所を溶接する場合)
- 残留応力が存在する領域において疲労、応力腐食、水素集積等により亀裂が発生・成長する。

aのケースでは、溶接の熱ひずみにより、欠陥部の破壊靱性値が大きく変化している可能性がある。このような場合には、同じような熱ひずみ履歴を受けた部材について破壊靱性値を求める必要がある。

bのケースでは、残留応力によるCTOD δ_r が予荷重によるCTOD δ_p に相当し、その後の負荷に対する限界CTOD δ_{ac} が(5)式で評価される。

cのケースでは、残留応力によるCTODは、亀裂の進展に伴い亀裂の先端に少しずつ生じ残存していく。このため、溶接残留応力の影響が、脆性破壊に移行する時点の亀裂先端に集中して発生することにはならず、残留応力が限界CTODに及ぼす影響は少ないと考えられる。なお、大きい繰返し荷重を受ける場合には繰返し荷重が予荷重としての影響を及ぼすことになり、応力腐食割れや水素の集積等環境の影響で亀裂が進展する場合には δ_c そのものが環境の影響を受け変化している可能性があり、別途検討の必要がある。

3.2 CTODの評価法

(2)式における ϵ および ϵ_y を用いたCTODの計算式を σ 、 σ_y および E を用いた式とし、形式的に次のように表現する。

$$\delta = F(\bar{\alpha}, \sigma, \sigma_y, E) \quad (6)$$

これを用い、供用前荷重によるCTOD δ_p 及び供用時荷重によるCTOD δ_a の評価式について以下検討する。

3.2.1 予荷重が作用した場合

まず、室温において荷重、除荷、再負荷する場合を考える。室温において単調に荷重した場合の σ -CTOD関係をFig. 4の曲線0-1-3とする。点1において除荷、再負荷すると1-2-1-3の経路をたどる。曲線1-2及び2-1は、(6)式の σ_y を $2\sigma_{y0}$ として、 σ を0から σ_p まで増大させた場合の σ -CTOD関係として得られる¹³⁾。

次に、室温において予荷重を負荷、除荷し、低温において再負荷する場合を考える。温度が低下すると降伏応力が σ_{y0} から σ_y へ高くなるとする。再負荷時の温度にて単調に荷重した場合の σ -CTOD関係をFig. 4の曲線0-4-5とする。これは、曲線0-1-3を縦横共に σ_y/σ_{y0} 倍したもの

Fig. 4 Schematic illustration of stress-CTOD curves under loading, unloading and reloading

である。室温において予荷重を負荷、除荷した点2から、低温において再負荷する場合の σ -CTOD関係は2-4-5の経路をたどる。この曲線2-4は、(6)式における σ_y を $\sigma_{y0} + \sigma_y$ として、 σ を0から $\sigma_p \cdot \delta_y/\delta_{y0}$ まで増大させた場合の σ -CTOD関係として得られる。なお、点4は定温における単調荷重曲線0-5が直線0-1の延長線と交わる点となる。

以上から、室温において予荷重を負荷、除荷し、低温において再負荷する場合の δ_p 、 δ_a の評価式は次となる。

$$\delta_p = F(\bar{\alpha}, \sigma_p, \sigma_{y0}, E) - F(\bar{\alpha}, \sigma_p, 2\sigma_{y0}, E) \quad (7)$$

$$\delta_a = F(\bar{\alpha}, \sigma, \sigma_{y0} + \sigma_y, E) \quad (\sigma \leq \sigma_p \sigma_y / \sigma_{y0}) \quad (8.1)$$

$$\delta_a = F(\bar{\alpha}, \sigma, \sigma_y, E) - \delta_p \quad (\sigma > \sigma_p \sigma_y / \sigma_{y0}) \quad (8.2)$$

δ_p としては、予荷重除荷後の残留CTODを採用している。

なお、図中の δ_{ac} は式(5)に従い、 δ_p に依存して変化するものとする。

3.2.2 溶接残留応力が存在する場合

(1) 溶接線に平行な欠陥

広い平板を突合せ溶接した場合の残留応力はFig. 5のような分布をする。溶接線に平行な欠陥に対しては、溶接線に直角な方向の残留応力が影響を及ぼす。この方向の残留応力は、広い範囲で $\sigma_{y0}/3$ 程度の一定値を示す。この場合、溶接残留応力は一様な外力と同じと見なしてCTODを評価することができる。残留応力によるCTOD及び室温において外力が作用する場合のCTODについては、2.2節において述べた。ここでは、低温において、すなわち降伏応力が高くなる状態において、外力が作用する場合のCTODについて検討する。

残留応力がない状態において、室温にて単調に荷重した場合の σ -CTOD関係をFig. 6の曲線0-1-2とする。ま

(a) 溶接線方向の応力分布 (b) 溶接線直角方向の応力分布

Fig. 5 Residual stress distributions of butt welded joint of wide plate

Fig. 6 Schematic illustration of stress-CTOD curves under residual stress and following loading

た、低温において単調負荷した場合の σ -CTOD 関係を同図の曲線 0-3-4-5 とする。後者は前者を縦横共に σ_y/σ_{y0} 倍したものである。残留応力が存在する部材を冷却し、低温において外力を作用させた場合の σ -CTOD 関係は 1-4-5 の経路をたどる。経路 1-4 は、室温において残留応力により降伏していた領域が、低温において再降伏する状態に対応するものである。点 4 は、低温における単調負荷曲線 0~5 が直線 0-1 の延長と交わる点となる。低温負荷時の σ -CTOD 関係 1-4-5 は、曲線 3-4-5 を垂直方向に平行移動させ、点 3 を点 1 まで移した曲線 1-6 により、CTOD を大きめに、簡単に評価できる。残留応力がある部材へ外力が作用した場合の CTOD をこの曲線 1-6 で評価することにすれば、評価式は次となる。

$$\delta_p = F(\bar{a}, \sigma_r, \sigma_{y0}, E) \quad (9)$$

$$\delta_a = F(\bar{a}, \sigma + \sigma_r, \sigma_y, E) - F(\bar{a}, \sigma_r, \sigma_y, E) \quad (10)$$

$$\sigma_r = \sigma_{y0}/3 \quad (11)$$

本評価式における δ_p としては、簡単のため、残留塑性

Fig. 7 Equivalent uniform residual stress as a function of tension stress region width of longitudinal welding residual stress

変形ではなく残留応力が作用した状態における CTOD を採用した。

3.2.3 溶接残留応力/溶接線に垂直な欠陥

溶接線に垂直な欠陥に対しては、溶接線方向の残留応力が影響を及ぼす。この方向の残留応力は、溶接線近くでは σ_{y0} 程度と高く、その外側では圧縮の値を示す。この場合の CTOD の評価法としては、次が考えられる。

- (1) 亀裂部の残留応力状態を圧縮予荷重を受けた後の残留応力状態で近似する¹⁷⁾。
- (2) 分布した残留応力による CTOD と同じ CTOD を生じさせるような残留応力 σ_{r-eq} を設定し、溶接線に平行な欠陥と同様に評価する。

ここでは、評価法を統一するために後者を採用することとする。 σ_{r-eq} は次のようにして設定することができる。すなわち、溶接線方向の残留応力分布を、Fig. 7 の中の挿絵のように、溶接線を中心とした大きさ σ_{y0} 、幅 $2x_r$ の矩形とし、圧縮の残留応力は無視する。このような残留応力による CTOD 及び一様な応力による CTOD を Dugdale 模型¹⁸⁾を用いて算定し、両者が等しくなるような応力 σ_{r-eq} を求めた結果が Fig. 7 の実線である。この実線の値は、次の近似式で破線のように評価される。

$$\frac{\sigma_{r-eq}}{\sigma_{y0}} = \frac{2x_r}{3\bar{a}} \quad (x_r \leq 1.2\bar{a}) \quad (12.1)$$

$$\frac{\sigma_{r-eq}}{\sigma_{y0}} = 1 - \frac{0.24\bar{a}}{x_r} \quad (x_r > 1.2\bar{a}) \quad (12.2)$$

ここで、 x_r : 引張りの溶接残留応力が存在する範囲の

Fig. 8 Comparison of experimental fracture stresses of preloaded Specimen²⁰⁾ with estimated ones using proposed method

1/2

δ_p および δ_a は, (9), (10) 式の σ_r として (12) 式の σ_{r-eq} を使用することにより算定される。なお, 残留応力が溶接部に集中して存在する場合及びここで採用したように等価な一様な応力として存在する場合における, 外力による開口変位 δ_{ac} を Dugdale 模型を用いて算定すれば, 前者より後者的の方が大きく評価される。

溶接線直角方向の残留応力分布は, 佐藤・寺崎による式¹⁹⁾等により算定できる。また, x_r は残留応力分布における引張残留応力の面積が等しくなるように設定すればよいと考える。

4 強度評価例

4.1 予荷重を受けた部材の破壊強度評価

提案した方法により, 越賀²⁰⁾による予荷重を受けた部材の脆性破壊試験の破壊強度を評価し実験値と比較して Fig. 8 に示す。限界 CTOD δ_c が報告されていないので, 予荷重を受けていない部材の破壊強度から, 提案した方法により δ_c を設定した。また, 予荷重を受けた部材の限界 CTOD δ_{ac} の設定に必要な δ_i は, 試験が機械加工切欠きについて実施されたことを考慮し 0.5 mm とした。

推定値は実験値より幾分低いが, 予荷重効果を考慮しない場合よりは高く推定されている。一般に, 試験においては大きな切欠きが使用されるため (越賀の実験では切欠長さは 125 mm), 予荷重による CTOD δ_p が大きな値となり, δ_{ac} の低下が大きくなる。現実には存在する欠陥はそれほど大きくないため δ_{ac} の低下はより少なく, 予荷重による強度改善効果は Fig. 8 の場合よりも大きく評価されとえられる。

Fig. 9 Comparison of experimental fracture stresses of welded Specimen^{10,11)} with estimated ones using proposed method

4.2 溶接残留応力を有する部材の破壊強度評価

Fig. 1 関連の一連の実験結果を論文から読み取り, 上に提案した方法により脆性破壊強度を評価した結果を実験値と比較して Fig. 9 に示す。Fig. 1 に比べ低応力域における実験値と推定値の相関が改善されている。

なお, 図中のプロット点を示す略称は永井らの標記に従った。実験データを明確に識別できなかったものについては省き, 逆に Fig. 1 に採用していないデータを採用したこともあり, プロット点は Fig. 1 と全く同じではない。残留応力は, 計測結果を参考に, σ_{y0} の大きさで 60 mm の範囲に分布するとした。残留応力の発生と切欠き加工の時間的關係は 3.1.2 項のケース c に相当することから, 残留応力による開口変位 δ_p が限界 CTOD δ_{ac} に及ぼす影響はないとした。また, 推定破壊強度は降伏応力を上限とした。

5 結 言

WES 2805-1997 の CTOD 設計曲線を用いた脆性破壊発生強度の評価において, 溶接残留応力の影響の評価精度を向上させる方法及び予荷重効果の評価法を検討した。得られた成果は以下である。

- (1) 予荷重が限界 CTOD に及ぼす影響に関するこれまでの研究成果を調査検討し, 供用開始前の CTOD が限界 CTOD に及ぼす影響の評価式 (5) を設定した。
- (2) 予荷重及び残留応力による CTOD, 及びその後の負荷による CTOD の評価方法を設定した。
- (3) 設定した方法により予荷重を受けた試験片及び残留応力を有する試験片の脆性破壊強度を評価し, 従来よりも精度よく破壊強度を推定できることを確認した。

なお、供用前荷重による CTOD δ_p が大きく δ_{ac} が 0 となる場合の取扱い、予荷重により溶接残留応力が緩和される干渉効果の取扱い等は今後の課題と考える。

本研究にあたり、日本造船学会構造・材料研究委員会材料・溶接部会部会長の宮田教授、その他の委員各位から有益な御討論を賜りました。ここに深くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. IX : Rules for Inservice Inspection of Nuclear Plant Components, Appendix A: Analysis of Flaw Indications, (1980)
- 2) 日本溶接協会 WES 2805-1980: 溶接継手のぜい性破壊発生に対する欠陥の評価方法, (1980)
- 3) British Standards Institution PD 6493: 1980: Guidance on Some Methods for the Derivation of Acceptance Levels for Defects in Fusion Welded Joints, (1980)
- 4) 日本溶接協会 WES 2805-1997: 溶接継手脆性破壊発生及び疲労き裂進展に対する欠陥の評価方法, (1997)
- 5) British Standards Institution PD 6493: 1991: Guidance on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Fusion Welded Joints, (1991)
- 6) British Standards Institution BS 7910: 1999: Guidance on methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures, (1999)
- 7) European Union: Structural integrity assessment procedure (SINTAP), (1999)
- 8) American Petroleum Institute API RP 579: Fitness-for-Service, (2000)
- 9) 日本溶接協会 WES-TR 2808: 2000: 動的繰返し大変形を受ける溶接構造物の脆性破壊性能評価方法, (2000)
- 10) 永井, 矢島, 梶本, 日野, 南: 構造的応力集中部における脆性破壊発生特性について (第 2 報), 日本造船学会論文集 第 148 号 (1980) p. 169-176
- 11) 永井, 矢島, 梶本, 川野, 縄田: 構造的応力集中部における脆性破壊発生特性について (第 4 報), 日本造船学会論文集 第 155 号 (1984) p. 360-367
- 12) H. Kihara, K. Masubuchi, K. Iida and H. Oda: Effect of Stress Relieving on Brittle Fracture Strength of Welded Steel Plate, IIW doc. X-218-59 (1959)
- 13) 酒井, 飯野: きれつの変位挙動と脆性破壊の発生, 日本造船学会論文集 第 127 号 (1970) p. 227-237
- 14) 大塚, 宮田, 西村, 柏木, 笠井: 切欠部からの破壊発生に関する COD-クライテリオンとストレッチド・ゾーン, 日本造船学会論文集 第 136 号 (1974) p. 249-257
- 15) 三村, 八木: 破壊靱性に及ぼす予荷重の効果, 圧力技術, 第 30 巻 5 号 (1992) p. 2-6
- 16) 山下, 阪野, 南, 小野塚: 残留応力を有する部材の脆性破壊強度評価へのローカルアプローチの適用, 日本造船学会論文集 第 186 号 (1999) p. 455-463
- 17) 阪野: COD の簡易評価法と脆性破壊発生強度の評価, 日本造船学会論文集 第 146 号 (1979) p. 436-443
- 18) D. S. Dugdale: Yielding of Steel Sheets Containing Slits, J. Mech. Phys. of Solids, Vol. 8 (1960) p. 100-104
- 19) 佐藤, 寺崎: 構造用材料の溶接残留応力分布に及ぼす溶接諸条件の影響, 溶接学会誌 45 巻 2 号 (1976) p. 150-156
- 20) 越賀: 予荷重が脆性破壊事故防止に果たす役割の Dugdale 模型による機構の考察, 日本造船学会論文集 第 127 号 (1970) p. 239-245