九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

WES2805における溶接残留応力評価の精度と問題点

川畑, 友弥
東京大学

後藤, 浩二
九州大学

山下, 洋一
株式会社IHI

https://hdl.handle.net/2324/6786321

出版情報：JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY. 92 (3), pp.166-172, 2023-04-16. Japan Welding Society
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

特集 溶接構造物維持規格における溶接残留応力影響考慮法の適正化のために

WES2805における溶接残留応力評価の精度と問題点*

川畑　友弥**，後藤　浩二***，山下　洋一****

川畑　友弥

後藤　浩二

山下　洋一

Accuracy and Some Problems in Welding Residual Stress Evaluation in WES2805*

by KAWABATA Tomoya**, GOTOH Koji***and YAMASHITA Yoichi****

キーワード　維持規格，欠陥評価規格，破壊靭性試験，溶接残留応力，設計曲線

1. はじめに

私たちの社会基盤を支えるエネルギー設備などに用いられる大規模鋼構造物においては，破壊防止のために使用状況を考慮した上で材料に一定の粘り強さ（＝靭性）を要求する．図1にはその考え方を模式的に示している．構造物の設計操業条件から外力による構造物応力集中部（通常は溶接継手部）に負荷される力の大きさを見積もる．また当該部に存在しうる欠陥の大きさを仮定することで，材料に要求すべき特性が導き出せる．これが破壊力学の考えに基づいた構造物の評価手法の基本である．では，この判定部分をなすアルゴリズムはどのようなものか．世界の多くの構造物の維持判断に用いられている考えは破壊力学パラメータの一つであるCTODを用いたアセスメント方法である．図2にその概要を示している．材料に求められる特性は破壊靭性値を指標とした評価値である．材料が保持している破壊靭性値を限界CTODと呼び，先ほどのコンセプトに基づき力と欠陥情報から計算された駆動力としてのCTODと大小関係を比較する事で，安全性を診断する．実際にはこの判定を行う維持規格（FFS; Fitness for service）に従って判定を行う．ここで，一般に溶接構造体では溶接残留応力が分布しており，この作用により破壊性状は大きく変化することが知られている．しかしながら試験片に加工した後の継手の残留応力は構造物のそれと大きく異なる可能性がある．そこで，材料靭性側から溶接残留応力の寄与を削除し，駆動力側に加算的に考慮することで，構造物における駆動力と材料靭性の大小を較べて破壊安全性を議論することを行っている．この評価を達成するため，溶接継手の破壊靭性値を求める際には，試験片に残留する残留応力を，主に機械的な手段で変化・平準化しておく．この手法が局部圧縮法（プラテン）や逆曲げ法と呼ばれる手法である．

破壊駆動力評価において考慮すべき強度評価部位近傍の溶接残留応力分布は複雑であり，実際の分布を得るためには歪ゲージ切断法や熱弾塑性FE解析等の比較的労力を有する実験・解析が逐一必要となるため，日本溶接協会規格WES2805等の種々の維持規格においては，残留応力分布を大胆に近似した取扱がなされている．溶接残留応力の取り扱い手法について，簡便かつ高精度手法の構築に対するニーズは高いが，周囲に関係する複数の規格群が存在するため，改めてこれらの問題点を整理し，より良いものを提唱しようとする動きを起こしにくい現状がある．そこで，こうした維持規格による利害を受けやすい大型鋼構造物主体で構成される船舶海洋分野において，盛んに活動を行っている代表的企業群から問題提起を受け，公益社団法人日本船舶海洋工学会内に「破壊駆動力評価における溶接残留応力影響の考慮法に関するFS委員会」という名称の研究委員会[1)]を設置し，学会という

*原稿受付　2023年1月13日
**正　員　東京大学　Member, The University of Tokyo
***正　員　九州大学　Member, Kyushu University
****正　員　(株)IHI　Member, IHI Corporation

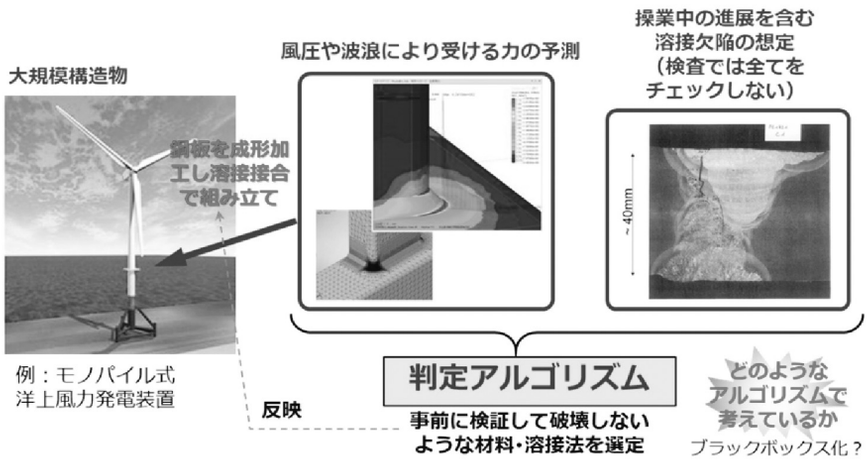

図１　大型鋼構造物破壊防止のための材料要求性能決定のためのコンセプト図

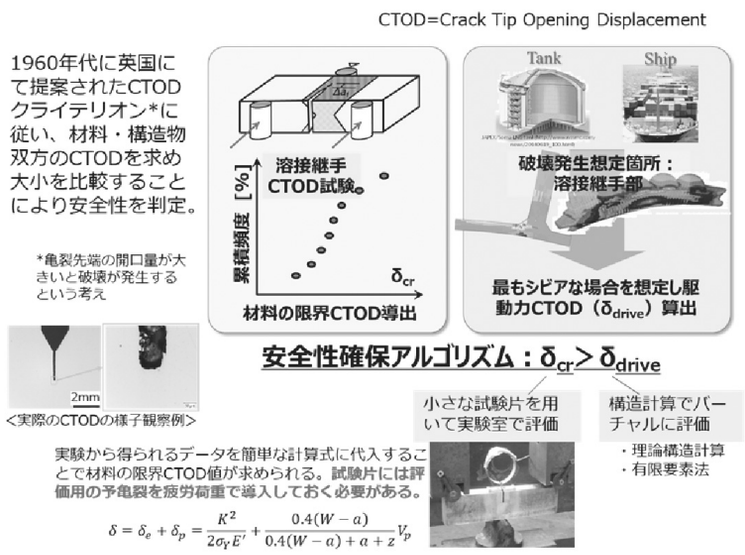

図２　CTOD クライテリオンを用いた構造物アセスメントの概要

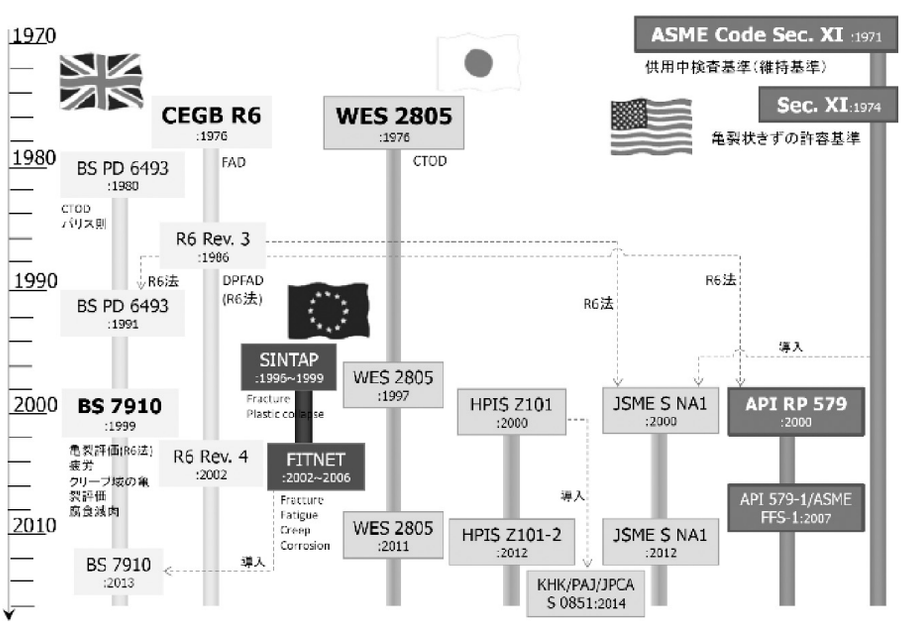

図３　欠陥評価規格の変遷[5)]

中立的立場において，再度ゼロベースで見直す活動を行った．本研究では，破壊駆動力評価における溶接残留応力取り扱い手法について，(1) 種々の規格における溶接残留応力影響の考慮方法について，溶接方法や継手形式等の関連因子影響の考慮方法についての調査，(2) 最新のFEAによる残留応力を含んだ駆動力計算結果とFFS規格の処理を比較，を行い，特に我が国で使用されることの多いWES2805[2)]で定められている残留応力の取り扱いの妥当性を評価した．将来的に簡便かつ高精度な残留応力の取り扱い手法の構築に向けた活動の端緒となることを目指しているものである．

2. 各国の代表的な維持規格と歴史

図3に本分野を代表する研究者が活動してきた日米英の代表的な規格の歴史的変遷を示す．およそ1970年代から活動が行われ様々な変遷を経て修正されてきていることが判る．日本においてもWES2805以外に日本高圧力技術協会規格（HPIS）[3)]，日本機械学会規格（JSME S NA1）[4)]があるが，広く溶接鋼構造物の破壊安全性にはWES2805が広く用いられる．

3. WES2805の残留応力考慮式の由来と問題点

3.1 現行規格内容

WES2805はCTODを破壊力学パラメータとして用いたFFS規格で我が国では鋼構造物，特にエネルギー分野の健全性評価に多く用いられている．評価のフローを図4に示している．この評価法の中心部分は図の最下段近傍にある，$\bar{c}$（欠陥）とε（作用するひずみ），δ（材料靭性）の関係性について判定する箇所であり，式(1)に示す設計曲線と呼ばれる関数が設けられている．

$$\delta = \begin{cases} \varepsilon_Y \bar{c}\left(\frac{\pi}{2}\right)\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_Y}\right)^2 & \frac{\varepsilon}{\varepsilon_Y} < 1.0 \\ \varepsilon_Y \bar{c}\left(\frac{\pi}{2}\right)\left\{9\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_Y}\right) - 5\right\} & \frac{\varepsilon}{\varepsilon_Y} \geq 1.0 \end{cases} \quad (1)$$

残留応力作用による影響はεの3つの構成要素の一つ（ε_2）として計算され，式(2)および**表1**に従って算出される．

$$\varepsilon_2 = \alpha_R \varepsilon_Y \quad (2)$$

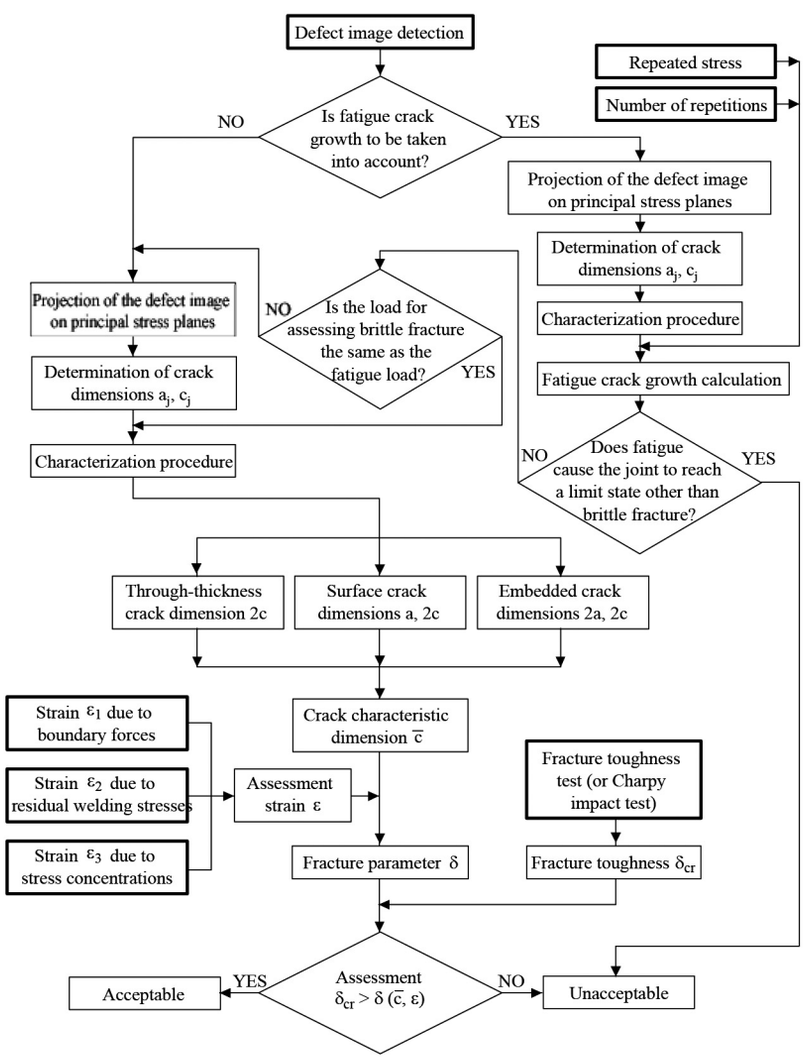

図4　WES2805における鋼構造物アセスメントの概要

表１　α_Rの値

Crack type	Butt joint and fillet weld joint	
	Parallel to the weld line	perpendicular to the weld line
Through-thickness	0	0.6
Embedded	0	0.6
Surface	0.36	0.6

また，溶接残留応力の分布が予め判っている場合には，より合理的な推定を与えるため，式(3)-(4)に従ってα_Rを決定できる．

$$\sigma_R^* = \left(\frac{2}{\pi}\right)\int_0^c \frac{\sigma_R(x)}{\sqrt{c^2 - x^2}}dx \tag{3}$$

$$\alpha_R = \left(\frac{\sigma_R^*}{\sigma_{Y0}}\right)\left(1.3 - 0.7\frac{\sigma_R^*}{\sigma_{Y0}}\right) \tag{4}$$

3.2　設計曲線における負荷条件の考え方

前節に記載した規格制定を背景から理解するために，まず溶接部近傍の欠陥についてWES2805設計曲線の考え方の把握は重要である．設計曲線は構造物や試験体の負荷条件と存在を仮定する欠陥の寸法に応じた欠陥先端の駆動力の関係性を記述しているものであり，WES2805ではCTODを破壊力学パラメータとして破壊駆動力の記述に用いている．しかし溶接残留応力や幾何学的応力集中を含む部材における「負荷条件」は部材全体の遠方で負荷する応力条件を採用することは妥当ではないだろう．実際の欠陥がそうした応力集中や引張残留応力の影響下にある場合には，き裂先端の駆動力は遠方応力のみを考慮した場合に比べてかなり大きい可能性もある．WES2805ではこうした条件を適切に考慮できる条件として，「き裂先端を含む領域に想定する円形領域がき裂開口方向へ伸びるときのひずみ」を負荷条件とした（図5）．この円形領域の設定範囲を小さくすれば応力集中や溶接残留応力の影響を受けやすく，大きくすれば遠方応力による公称ひずみに近づく．

この円形領域のひずみは複雑な応力集中や溶接残留応力を考慮しなければ様々な解析解や数値解析解のもとで計算可能である．CTOD問題や弾塑性材料に親和性のあるDugdaleモデル[7]を用い一部Westergaard応力関数を

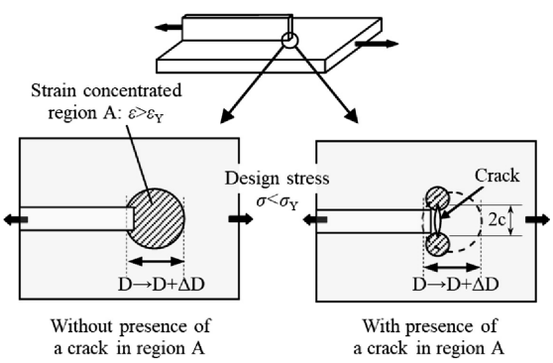

図５　WES2805で想定する応力集中部のひずみと変形[6]

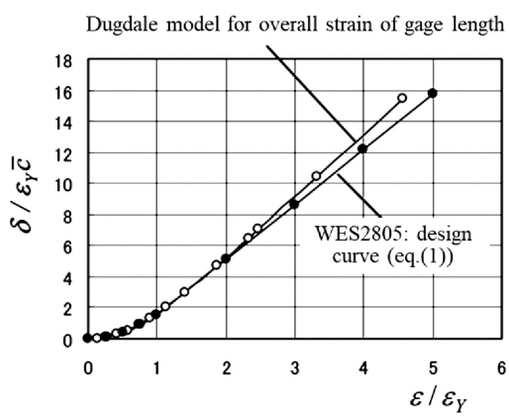

図６　WES2805で設定した設計曲線とD=2cの場合のDugdaleモデル解の関係[6]

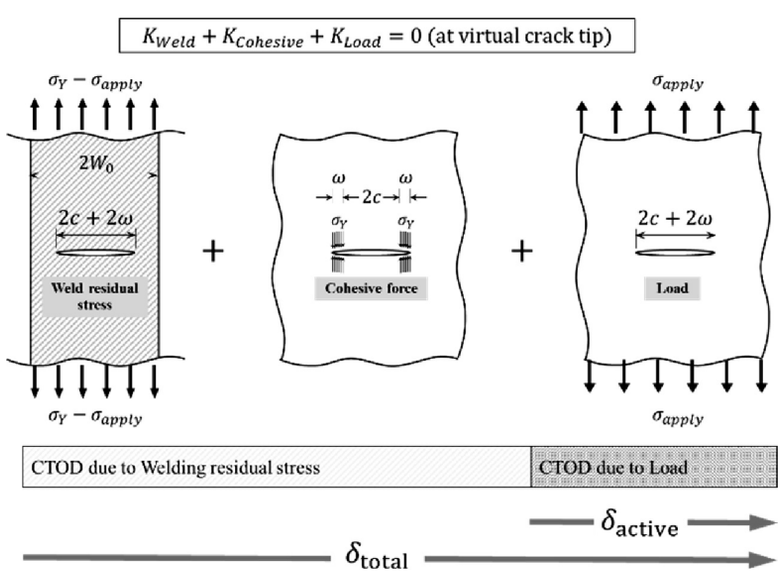

図７　Dugdaleモデルによる溶接残留応力が重畳した場合のCTODの計算方法[12]

用いることでき裂先端から任意位置における変位を求めることができる[8]．WES2805の設計曲線（式(1)）はこうして得たDugdaleモデル解とほぼ一致するように設定されている．

3.3 Active CTOD概念[9)10)]による残留応力効果定量化

溶接残留応力を考慮しない場合の領域ひずみに残留応力の影響による領域ひずみを単純に加算して負荷力とするのは明らかに過大である．大きな残留応力がある溶接継手部に切欠をつけた試験片をいくら低温にまで冷却しても，それだけではぜい性破壊は起こらず，新たに外荷重を与えて初めて破壊が生ずる例を多く経験しているからである[11]．このことは，残留応力によっても亀裂は開口してCTOD が生ずるが，このCTOD は破壊に直接には関与せず，外荷重によって新たに生ずるCTOD のみが破壊に寄与すると解釈できる．これが Active CTOD という考え方である．この考え方をもとに，図7に示すようにDugdaleモデルの考えに基づき弾性解の重ね合わせによりき裂先端位置のK値が特異応力場を持たない性質を利用し，弾性解に基づく後方変位計算からCTODを求める方法により評価した．ここで残留応力による寄与は幅 W_0 を種々変化させた有限幅帯板モデル内に溶接方向に垂直な貫通欠陥を想定し，常に引張降伏応力が作用している状況における応力拡大係数解から導いた[12]．計算の結果，Active CTODはTotal CTODよりも小さく推移するが，評価ひずみに換算するとその差はおよそ0.6であった（図8）．しかし，一律に0.6を加算すると残留応力の小さな継手形式などで過剰な保守性をもたらすことが明白であるため，様々な残留応力分布の存在を等分布の応力に関する手法を用いて（式(3)），上記（図7）同様のアプローチでシフトすべきひずみ量を計算した．図9には計算結果を示しており，これらのプロットを通る近似曲線（式(4)）も図中に記載している．残留応力分布を直接知ることができる場合には，このように α_R をユーザ自身で求めて適用することも可能である．

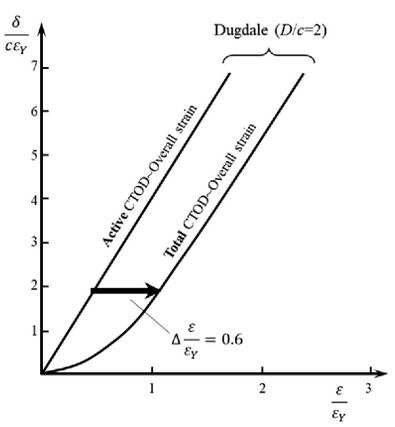

図8　Active CTOD評価を実現するための評価ひずみへの加算量[12]

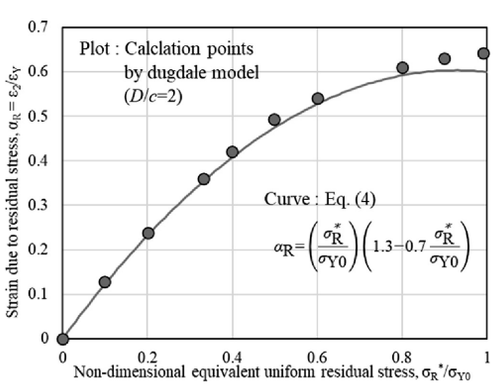

図9　様々な溶接残留応力分布下においてActive CTODの考えを実現するための評価ひずみシフト量計算結果[2)12]

4. 残留応力分布を忠実に再現したFE解析を正解値とした場合の規格による残留応力考慮法の精度評価

4.1 代表的FFS規格における残留応力考慮法精度比較

図10には残留応力分布を忠実に再現したFE解析で得たCTOD評価値との比較を示している．図10の左側は前報にて詳述したAbaqusによる評価結果，右側は大阪大学接合研究所によって開発されたJWRIAN[16]による評価結果である．いずれも黒線に有限要素解を示しており，この線に近い挙動を示しているかで各FFS規格の残留応力考慮法の精度を評価している．負荷応力が増加するにしたがい残留応力の影響度は相対的に小さくなる関係はいずれも明瞭であり，物理的直感にも符合している．しかしその大小を評価すると以下の表2の通りに整理可能である．

4.2 代表的FFS規格における残留応力考慮法精度比較

図11(a)にAbaqusで計算したCTODとWES2805で評価したCTODを比較して示す．スティフナの止端部に存在する溶接部に平行な欠陥を評価対象とするため，規格に則れば $\alpha_R=0.36$ で計算するべきである．しかしながら残留応力ありのモデルでWES2805が評価過小であったた

表2　FFS規格による残留応力考慮法精度比較

(1)	スティフナの表面欠陥	BS, API/ASME が FEM との一致度が高い．特に Abaqus での計算結果とは高精度で一致した．一方で WES2805 は残留応力の影響考慮が不足していると言える．
(2)	突合せ溶接線と平行な表面欠陥	実際の亀裂先端駆動力への溶接残留応力の影響はさほど大きくなく，各 FFS 規格は過大な考慮を行っているようである．WES2805 はそれほど過剰とは言えない．
(3)	突合せ溶接線と垂直な貫通欠陥	WES2805 はほぼ FEM 解と一致する結果を与える．他規格は影響評価が過小である．

め，ここでは溶接線に垂直な欠陥に適用する $\alpha_R=0.60$ も試しに計算してみた結果を示している．さらにWES2805で導入したActive CTODの考え方をFEM解析結果にも導入してみた結果を図11(b)に示す．Active CTODで整理すると残留応力ありの条件では最終的なCTOD値は比較的一致していると言える．しかし，スティフナモデルについてはWES2805設計曲線で予測するCTODそのものが過大という問題点がある．またそれを補正した状態を想定すればWES2805は残留応力の考慮が過小となる可能性がある．

次に，図12には突合せ継手・溶接線平行方向表面欠陥について同様の比較結果を示す．$\alpha_R=0.36$ での計算結果が主な比較対象であるが，$\alpha_R=0.60$ での計算も実施している．残留応力なしの基本モデルは悪くない一致を示す．

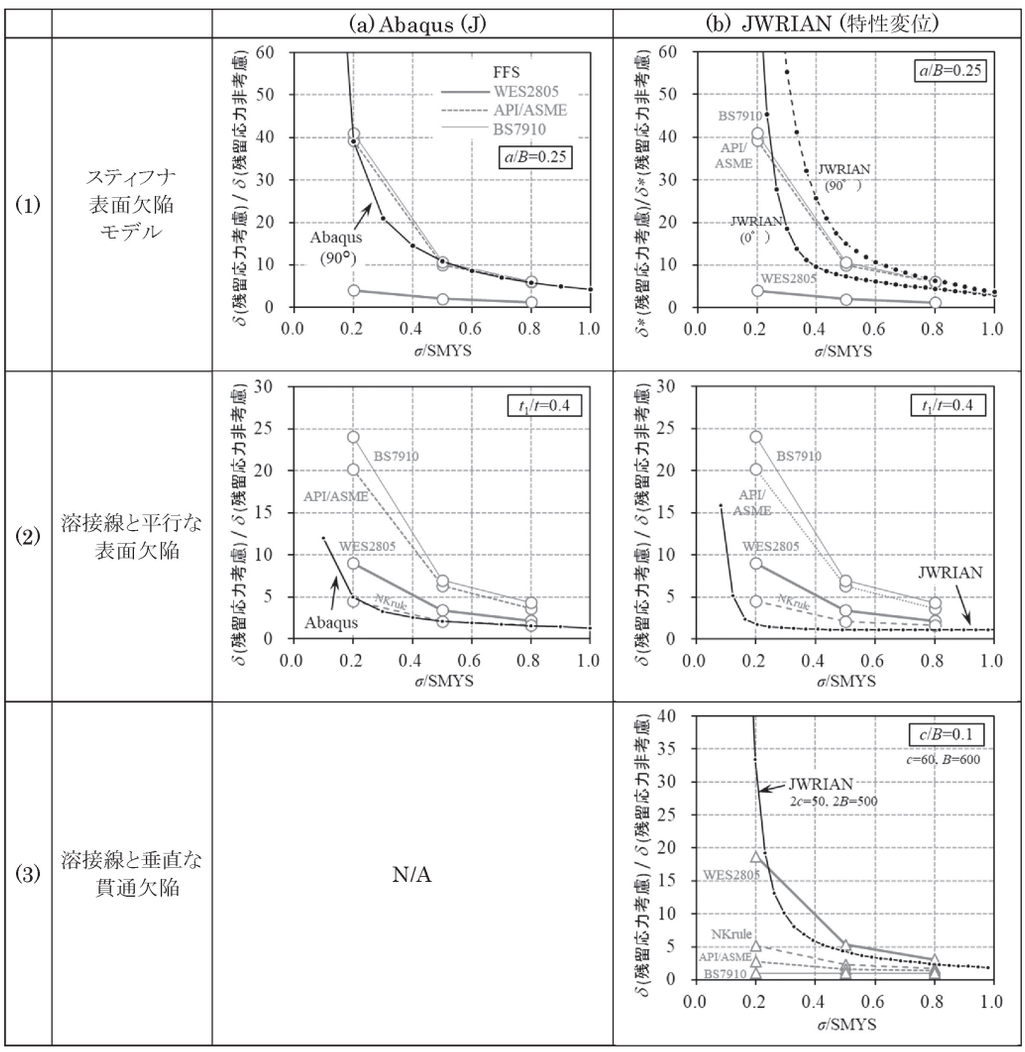

図10　各規格における残留応力考慮法の精度検証結果

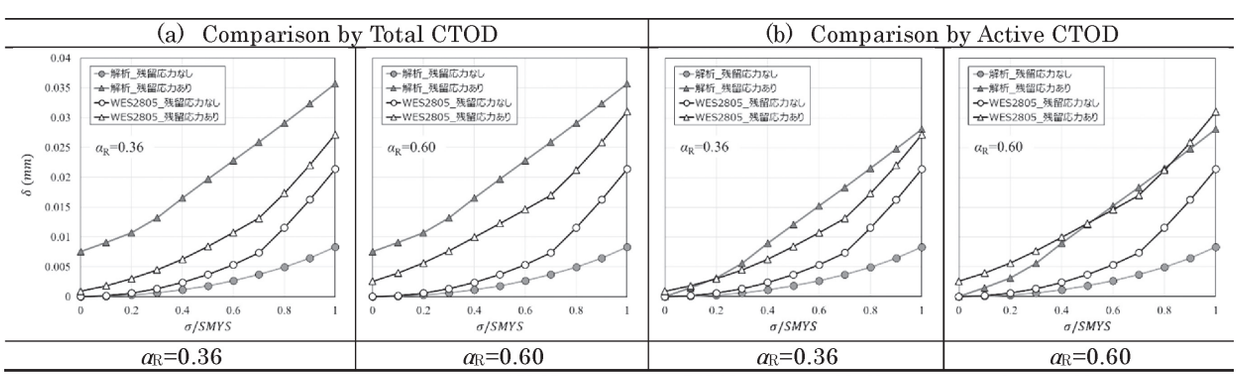

図11　WES2805によるCTOD計算結果とFEM計算結果との比較［スティフナ表面欠陥］

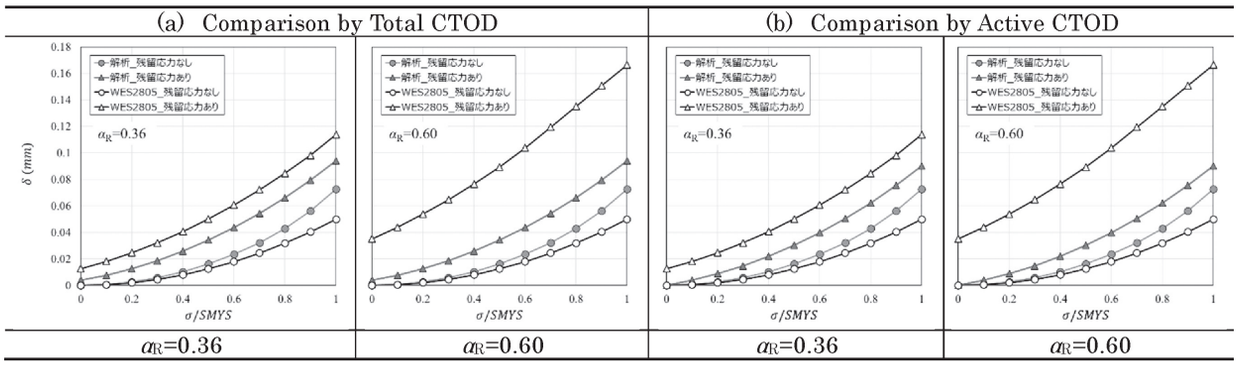

図 12　WES2805 による CTOD 計算結果と FEM 計算結果との比較［突合せ継手・溶接線平行方向表面欠陥］

ただし, WES2805 は FEM 解析に対しやや過小（非安全側）である．この差を補正したことを想定すると $\alpha_R = 0.36$ では過大な駆動力算定をもたらすことが言えよう．

つまり，高精度化のためには，単に溶接残留応力の影響のみを是正するのではなく，設計曲線の保守性・非安全性も併せて見直す必要があることが判る．

5. おわりに

今回，３種の溶接構造を取り上げ溶接残留応力解析を含む FEM 解析と規格による駆動力評価の双方を平行して実施することにより，現在，各分野で使用されている代表的 FFS 規格における残留応力考慮法を比較した．WES 規格ではスティフナモデルで考慮量過小，突き合せモデルで考慮量過大（溶接に平行な欠陥），適正（溶接に垂直な欠陥）な結果を得た．FEM 解析結果も WES2805 の取り扱いと同様 Active CTOD の考え方により整理してみると全体として悪くない結果を与えることが示唆された．ただし，そもそも残留応力を考慮しない基本の設計曲線がモデルに寄らず一通りで与えることもあり，今後精度改善に向けた活動を行う際にはそれぞれの影響因子の切り分けが必要になるであろう．

参考文献

1) 日本船舶海洋工学会，プロジェクト研究委員会P-59, https://www.jasnaoe.or.jp/research/committee.html
2) 日本溶接協会規格，WES2805；溶接継手のぜい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版（1997.3），2007版（2007.11）.
3) 日本高圧力技術協会規格, HPIS Z101-2001；圧力機器の亀裂状欠陥評価法, 2001.
4) 日本機械学会, JSME SNA1-2019, 発電用原子力設備規格 維持規格, 2019.
5) 戎田，供用適性評価に関する国内外規格の最新動向，WE-COMマガジン, 日本溶接協会, Vol. 21, 2016.7.
6) 萩原，WES2805-2007の規格改正のポイント，溶接学会誌, Vol. 77, No. 7, 2008, pp.57-60.
7) Dugdale, D. S., Yielding of Steel Sheets Containing Slits. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 8, 1960, pp. 100-108.
8) Anderson, T. L., Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications, Fourth edition, CRC Press, 4th release, 2017.
9) 秋田，矢田，酒井：鋼構造物に発生する脆性破壊と残留応力，日本造船学会論文集, Vol. 125, 1969, pp. 227-235.
10) 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, Vol. 127, 1970, pp.227-237.
11) 金澤，三村，町田，宮田，萩原，脆性破壊発生のクライテリアに関する考察，日本造船学会論文集，129（1971），pp. 237-246.
12) 山下，鳥越，残留応力によるひずみの検討方法（案），FTS-WG2資料（非公開），2004.7.［私信］
13) British Standard, BS 7910：2019, Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures, 2019.
14) API RP 579-1 / ASME FFS-1, Fitness-for-Service, 2016.
15) 日本海事協会, 鋼船規則, M編, 溶接, 2019.
16) ㈳日本船舶海洋工学会，破壊駆動力評価における溶接残留応力影響の考慮法に関するFS委員会 最終報告書，2022, https://www.jasnaoe.or.jp/research/dl/report.P59.r2.pdf