

3-9

溶接構造の健全性評価*



南 二三吉**

Fracture Assessment of Welded Structural Components*

by MINAMI Fumiyo**

キーワード

破壊評価, 溶接構造要素, WES2805, CTOD 設計曲線, 破壊評価線図 (FAD), BS7910, 塑性拘束緩和補正, ISO27306

1. はじめに

我が国では、溶接鋼構造物の不安定破壊評価手法として日本溶接協会規格 WES2805⁹⁾があり、これまで船舶や低温貯槽、海洋構造物、パイプラインなどの破壊評価に多くの適用実績がある。WES2805 は1976年に制定され、き裂先端開口変位 (CTOD) を破壊駆動力として用いる CTOD 設計曲線を採用している。1980年に信頼性評価工学の概念を取り入れて一部改正、1997年に破壊力学・破壊靱性評価手順の進歩をふまえて全面改定された後、最近の破壊力学研究の成果に基づいて評価精度向上を図るべく2007年に2度目の全面改定がなされた。

CTOD 設計曲線を用いる破壊評価法は、Burdekin-Stone の研究⁹⁾を基に英国溶接研究所 (TWI) で提案された方法で、本家の英国では規格ドラフトの PD6493⁹⁾に採用されていた。しかし、1991年の PD6493 改訂版から破壊評価線図 FAD (Failure Assessment Diagram) を用いる方法に切り替わり、現在の英国規格 BS7910⁹⁾となるに至っている。FAD は、英国中央電力庁 CEGB (Central Electricity Generating Board) の R6 アプローチ⁹⁾ (最新版は文献⁶⁾) に導入されたのが最初で、現在では、BS7910 の他、欧州統一破壊評価手順である FIT-NET^{7, 8)}、その前身の SINTAP⁹⁾、米国石油協会 (API) と機械学会 (ASME) の合同規格 API 579-1/ASME FFS-1¹⁰⁾など、欧米の供用適性評価 (Fitness-for-Service Assessment) 手順に広く採り入れられている。

これらの破壊評価法では、「破壊靱性試験片の破壊抵抗値 (破壊靱性値) = 構造要素の破壊抵抗値」とする破壊基準が一般に適用されている。しかし、この破壊基準では、しばしば構造要素の実破壊性能を過小に評価 (過度

に安全側評価) する傾向にあり、特に、降伏比 (= 降伏応力/引張強さ) の高い高強度鋼においてこの傾向が著しい。これは、破壊靱性試験片と構造要素の塑性域の発達様式の違いから、破壊靱性試験片の塑性拘束が構造要素に比べて厳しいことが原因している。最近、この塑性拘束差を補正して、破壊靱性試験結果から構造要素の破壊性能をより適正に評価する手法が ISO 規格 (ISO 27306¹¹⁾) として公開された。

以下では、WES2805 の破壊評価手順、FAD 法による溶接継手の破壊評価手順 (BS7910 を例に記述)、および、ISO27306 の塑性拘束補正手法について簡単に述べる。

2. 日本溶接協会規格 WES2805

WES2805 は、構造的不連続部などの応力・ひずみ集中部から比較的大きな塑性変形を伴って脆性破壊が生じる場合の破壊評価法で、構造要素に作用するひずみからき裂先端開口変位 (CTOD, δ) を求め、それを材料の破壊抵抗値 (破壊靱性値) δ_{cr} と比較することで、当該構造からの脆性破壊の可能性を判断する。WES2805 は、他の破壊力学的手法と同様に、①き裂を有する構造要素の破壊限界評価、②構造要素の健全性確保のための材料の必要破壊靱性値の評価、③構造要素の欠陥許容限界評価、の3様式の破壊評価に適用できるが、ここではき裂やきずなどの欠陥許容判定 (図1) を例にとって評価手順を概説する。

(1) 欠陥寸法の特性格

検査で見つかる欠陥は表面欠陥、埋没欠陥、板厚貫通欠陥など様々であるが、それらをすべて無限平板に存在する等価な板厚貫通き裂へと置き換える。この置き換えには線形弾性破壊力学を適用し、欠陥像をモデル化したき裂と応力拡大係数 K が等しくなる無限平板の板厚貫通き裂の寸法 $2a$ を求める (これを等価貫通き裂寸法という)。欠陥は厳しめにモデル化し、欠陥像を覆う半楕円表

*原稿受付 平成22年4月7日

**正 員 大阪大学大学院工学研究科 Member, Graduate School of Engineering, Osaka University

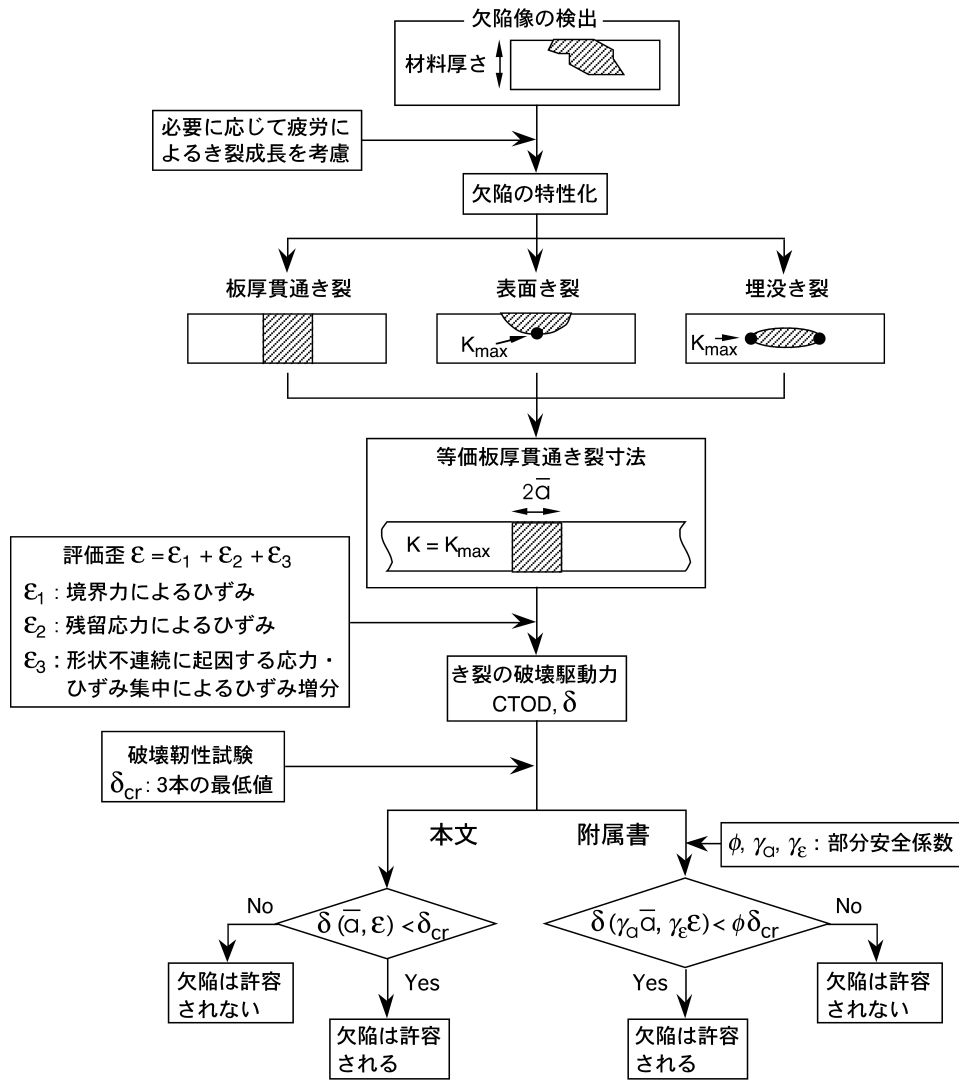


図1 WES2805 による欠陥評価手順

面き裂（表面欠陥の場合）、楕円き裂（埋没欠陥の場合）、板厚貫通き裂（部材厚さの1/2を越える深さの表面欠陥の場合など）にモデル化する。表面欠陥や埋没欠陥では、 K 値がき裂前縁に沿って変化するので、その最大値 K_{max} を適用する。

(2) き裂の作用ひずみの評価

き裂に作用するひずみ（局所ひずみ） ϵ を次式で算定する。

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 ϵ_1 ：境界力によるひずみ（き裂に作用する公称の応力/縦弾性係数 E ）、 ϵ_2 ：溶接残留応力によるひずみ、 ϵ_3 ：応力・ひずみ集中によるひずみ増分。

溶接残留応力によるひずみ ϵ_2 は、

$$\epsilon_2 = \alpha_R \epsilon_Y \quad \dots\dots\dots(2)$$

で定義し（ ϵ_Y ：材料の降伏ひずみ）、係数 α_R は、き裂の種類と溶接線に対するき裂の方向に応じて表1で与える。（例えば、溶接線に直角なき裂では $\alpha_R = 0.6$ となっているが、これは溶接部近傍で溶接線方向に材料の降伏応力レベルの残留応力が存在した場合、その残留応力場に

表1 溶接残留応力によるひずみ ϵ_2 の評価のための係数 α_R

き裂の種類	突合せ、および、すみ肉溶接継手（溶接まま）	
	溶接線に平行なき裂	溶接線に直角なき裂
板厚貫通き裂	0	0.6
埋没き裂	0	0.6
表面き裂	0.36	0.6

* PWHTされる場合は、残留応力完全除去以外は、上記の15%の数値とする。

存在するき裂の CTOD は、残留応力のない平板が $0.6 \epsilon_Y$ の作用ひずみを遠方で受ける場合の CTOD にほぼ等しいことによる)

また、応力・ひずみ集中によるひずみ増分 ϵ_3 は、評価対象部のひずみ集中係数 $\bar{K}_\epsilon (>1)$ 用いて

$$\epsilon_3 = (\bar{K}_\epsilon - 1) \epsilon_1 \quad \dots\dots\dots(3)$$

で評価する。ひずみ集中係数 \bar{K}_ϵ は、評価対象部の平均的な弾性応力集中係数と材料のひずみ硬化指数 n から求める（詳細は WES2805 を参照）。

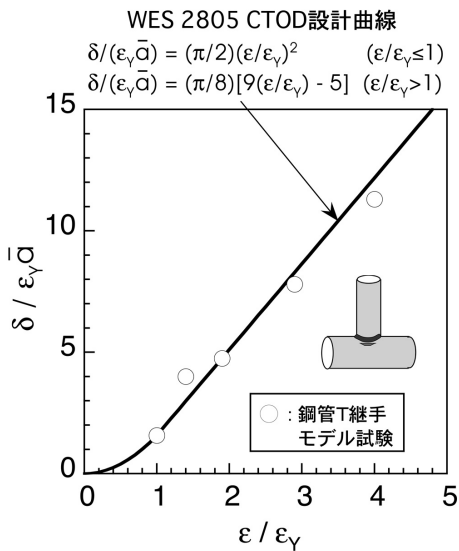


図2 WES2805 の CTOD 設計曲線と鋼管T継手に存在するき裂への適用

(3) き裂の破壊駆動力の評価

無限平板の板厚貫通き裂（長さ $2a$ ）に特性化されたき裂の破壊駆動力を、次式の CTOD 設計曲線（図2）で評価する。

$$\delta = \begin{cases} \epsilon_y \bar{a} (\pi/2) (\epsilon/\epsilon_y)^2 & : \epsilon/\epsilon_y < 1 \\ \epsilon_y \bar{a} (\pi/8) [9(\epsilon/\epsilon_y) - 5] & : \epsilon/\epsilon_y \geq 1 \end{cases} \quad \dots\dots(4)$$

この CTOD 設計曲線は、多くの数値解析と大型実験の結果をもとに決定されている。ここで、ひずみ ϵ は式 (1) で算定されるが、このひずみ ϵ はき裂の存在しない場合にき裂想定部に働く局所ひずみである。このような局所ひずみを適用するのは、評価対象部が元々無欠陥状態で構造として予期されるひずみに耐えればよいとの思想に基づく。

(4) 材料の破壊靱性値 δ_{cr} の決定

CTOD 破壊靱性試験によって、評価に用いる材料の破壊靱性値 δ_{cr} を決定する。CTOD 破壊靱性試験は、WES 1108¹²⁾ または WES 1109¹³⁾ によるが、これらに準じる試験規格（ISO 12135¹⁴⁾ や BS 7448^{15, 16)} など）を用いて行ってもよい。破壊靱性値 δ_{cr} は、評価温度における3個の試験結果の最低限界 CTOD を採用する。同一試験条件において3個以上の試験データがあるときには、3個の最低値と等価な値（MOT）¹⁷⁾ を用いる。

なお、破壊靱性試験をしようとも、やむを得ない理由でそれができない場合には（既設構造物で破壊靱性試験データが残されていない場合など）、シャルピー衝撃試験結果から破壊靱性値 δ_{cr} を推定する手順が与えられている。

(5) 判定

以上の手順で求めたき裂の破壊駆動力が次の条件

$$\delta < \delta_{cr} \quad \dots\dots\dots(5)$$

を満たす場合、当該欠陥は許容されると判断する。

WES2805 は、材料強度や外力の不確実性は念頭に置き

ながらも、多分に決定論的立場をとっており、最終的には安全側の判定となるように工学的単純化を図っている。しかしながら、国内外の構造設計や欠陥評価基準^{4, 18)} において、強度や外力の不確実性を考慮した信頼性工学的手法が開発されており、WES2805 でもそれに対応すべく、評価の信頼性を一定に保つための部分安全係数を採用入れた手順を附属書で示している。

3. FAD (Failure Assessment Diagram) 法

3.1 FAD 法の概要

FAD 法は、次の二つの評価基準

- ① 線形弾性破壊力学による破壊評価：応力拡大係数 K が材料破壊靱性値（FAD 法では破壊靱性値を K_{mat} と表記）に達したときに脆性破壊が発生、
 - ② 塑性崩壊による limit load 評価：外荷重 F が崩壊荷重 F_L に達したときに塑性崩壊が発生、
- を上下限として、その中間域（通常は中間域の破壊現象が多い）の破壊を横軸に load ratio $L_r (=F/F_L)$ 、縦軸に fracture ratio $K_r (=K/K_J = K/K_{mat})$ をとった破壊評価曲線 FAC (Failure Assessment Curve)

$$K_r = f(L_r) \quad \dots\dots\dots(6)$$

を用いて、完全脆性破壊から塑性崩壊までを包括的に評価しようとする手法である。ここで、

K : 評価対象部材の応力拡大係数（負荷レベルによらず弾性体での K 評価式を適用）、

K_J : 評価対象部材の J 値（弾塑性破壊力学パラメータ）から換算した応力拡大係数

で、FAC はいわば応力拡大係数の弾性成分と弾塑性成分の比を表している（ある荷重レベル F で破壊が生じたすると、その時の K_r は破壊時の K/K_J であり、結局、各荷重レベルでの K/K_J を連ねた曲線が FAC として得られることになる）。通常、評価対象部材の弾塑性破壊限界は、破壊靱性試験片の弾塑性破壊限界 K_{mat} と等しいと考えるので、FAD では K_J は K_{mat} で置き換えられる。

応力拡大係数 K の代わりにき裂先端開口変位 CTOD を指標にすると、縦軸の fracture ratio は $\sqrt{\delta_r} = \sqrt{\delta_{wp}^c / \delta_{mat}}$ と表記されるが、 $K_r = \sqrt{\delta_r}$ より結局 FAC は K を指標としたものと同じである。ここで、 δ_{wp}^c : 評価対象部材の CTOD の弾性成分、 δ_{mat} : 評価対象部材の CTOD 弾塑性破壊靱性値。 δ_{wp}^c は、例えば平面応力状態にある広幅平板では、応力拡大係数 K から $\delta_{wp}^c = K^2 / E\sigma_y$ で算出される（ σ_y : 材料の降伏応力）。

Dugdale モデル¹⁹⁾を用いて、FAC について考える。Dugdale モデルによると、長さ $2c$ の貫通き裂を有する無限平板が遠方き裂に垂直に負荷（作用応力 σ ）を受けるとき、CTOD は次式で算出される。

$$\delta = \frac{8\sigma_y c}{\pi E} \cdot \ln \left(\sec \frac{\pi \sigma}{2\sigma_y} \right) \quad \dots\dots\dots(7)$$

降伏規模によらず、 $\delta_{mat} = K_{mat}^2 / E\sigma_y$ を満たす $\delta_{mat}(K_{mat})$ で破壊すると考えると、

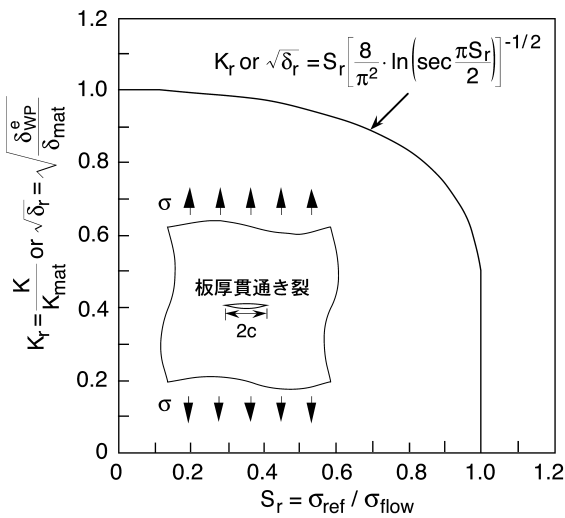


図3 PD6493 (1991, 1997年版) レベル2 FAD

$$\frac{K_{mat}^2}{\sigma_Y E} = \frac{8\sigma_Y c}{\pi E} \cdot \ln\left(\sec \frac{\pi\sigma}{2\sigma_Y}\right) \quad \dots\dots(8)$$

となり、作用応力 σ のときの応力拡大係数 $K = \sigma\sqrt{\pi c}$ (負荷レベルによらずに K の弾性解を適用した見かけの応力拡大係数) を適用すると、次式が導かれる。

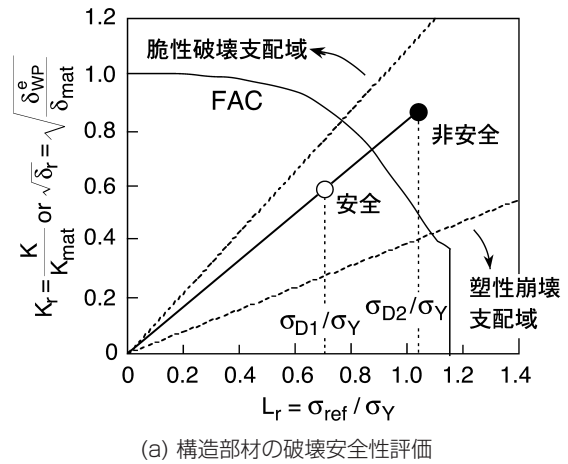
$$K_r = \sqrt{\delta_r} = f(S_r) = S_r \left[\frac{8}{\pi^2} \ln\left(\sec \frac{\pi S_r}{2}\right) \right]^{-1/2} \quad \dots\dots(9)$$

Dugdale モデルでは、塑性崩壊は作用応力 $\sigma = \sigma_Y$ の時となるが、塑性崩壊は部材のネット断面平均応力 σ_{net} (き裂を除く残り断面の平均応力) が材料の流動応力 σ_{flow} ($= (\sigma_Y + \sigma_T)/2$: 降伏応力と引張強さの平均値) に達したときに起きるとする考え方が一般的で、1991年および1997年のPD6493では、式(9)において $S_r = \sigma_{ref}/\sigma_{flow}$ と置いたものをレベル2FADに適用している (σ_{ref} は部材の参照応力で、通常 σ_{net} が用いられる)。こうして得られるFACを図3に示す。Dugdale モデルによるFACは、 S_r の大きな領域では精度が不十分のため、1999年にPD6493がBS7910と改訂されてからは採用されず、後述の形のFACとなっている。

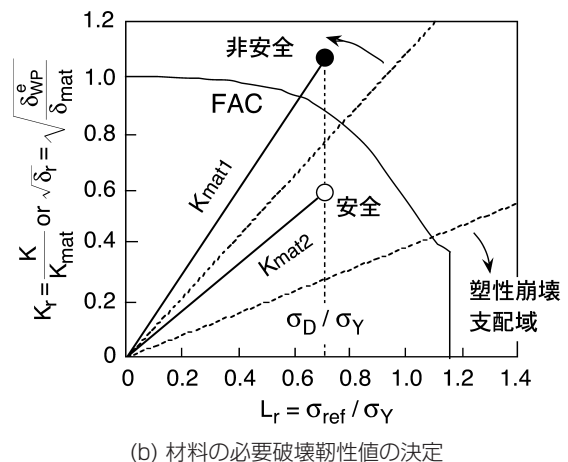
FAD法による破壊評価は次のように行う(図4)。き裂を有する構造部材の破壊駆動力を、負荷レベル(降伏規模)によらず応力拡大係数 K の弾性解(またはCTODの弾性成分)で評価する。従って、破壊駆動力としての $K_r = K/K_{mat} (= \sqrt{\delta_r} = \sqrt{\delta_{WP}^c/\delta_{mat}})$ は、load ratio L_r (図4では $L_r = \sigma_{ref}/\sigma_Y$) に対して線形に変化する。ここで、材料の破壊靱性値 K_{mat} が与えられたとき、設計荷重 F_D (設計応力 σ_D) に対して、

$K_r (= \sqrt{\delta_r})$ の評価点が FAC の内側に位置すれば当該構造部材は破壊しない(安全)、

$K_r (= \sqrt{\delta_r})$ の評価点が FAC の外側に位置すれば当該構造部材は破壊する(非安全)、



(a) 構造部材の破壊安全性評価



(b) 材料の必要破壊靱性値の決定

図4 FAD法による破壊評価の概念図 (σ_D : 設計応力)

と判断する。当該構造部材が破壊に至らないための材料の必要破壊靱性値 $K_{mat}^R (\delta_{mat}^R)$ も、評価点が FAC の内側に存在するように $K_{mat} (\delta_{mat})$ を選定することで決定できる。

このように、FAD法は、構造部材の応力拡大係数 K の弾性解を用いるだけで脆性破壊から塑性崩壊までを包括的に評価できるようにしているのが特徴である。き裂部材の応力拡大係数 K の算定には、一般にハンドブック²⁰を用いる。

FAD法によって構造部材の破壊安全性評価を行うには、破壊評価曲線 FAC をいかに定めるかがポイントであり、各国の機関^{4, 6, 7, 10}では多くの研究をもとに破壊評価結果が安全側となるように FAC を与えている。

3.2 BS7910-FADによる溶接継手の破壊評価手順

英国規格 BS7910-2005⁴⁾では、破壊評価のレベル分けをしたFADを導入している(図5)。

Level 1: Simplified assessment

FAD法を用いる場合(Level 1A)と、用いない場合(Level 1B)があり、FAD法を適用する場合は、FACを次のように設定する。

$$\text{Level 1A: } f(L_r) = K_r = \sqrt{\delta_r} < 1/\sqrt{2} \text{ for } S_r < 0.8 \dots\dots(10)$$

ここで、 $S_r = \sigma_{ref}/\sigma_{flow}$ (σ_{ref} : 部材の参照応力で、通常、ネット断面の平均作用応力 σ_{net} を用いる、 σ_{flow} : 流動応力

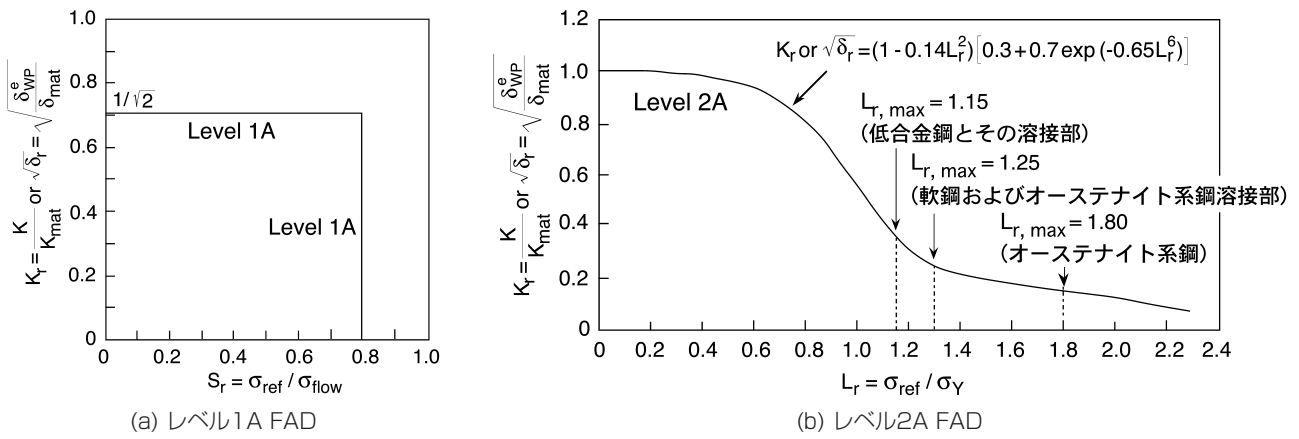


図5 BS7910 による破壊評価線図

表2 BS7910 における溶接残留応力の取扱い

	Level I		Level II		
	溶接まま (σ_Y : 室温での σ_Y)	PWHTされる場合 (σ_Y : 室温での σ_Y)	残留応力分布 のある場合	溶接まま 残留応力が 一様とみなせる場合 (σ_Y : 評価温度での σ_Y)	PWHTされる場合 (σ_Y : 室温での σ_Y)
溶接線に 直角なき裂	き裂の存在する 材料の σ_Y	き裂の存在する 材料の $0.3\sigma_Y$	Annex Q	Min. ($\sigma_Y, \sigma_Y(1.4 - \sigma_{ref}/\sigma_{flow})$)	き裂の存在する 材料の $0.3\sigma_Y$
溶接線に 平行なき裂	Min. ($\sigma_Y^{BM}, \sigma_Y^{WM}$)	Min. ($0.2\sigma_Y^{BM}, 0.2\sigma_Y^{WM}$)			Min. ($0.2\sigma_Y^{BM}, 0.2\sigma_Y^{WM}$)

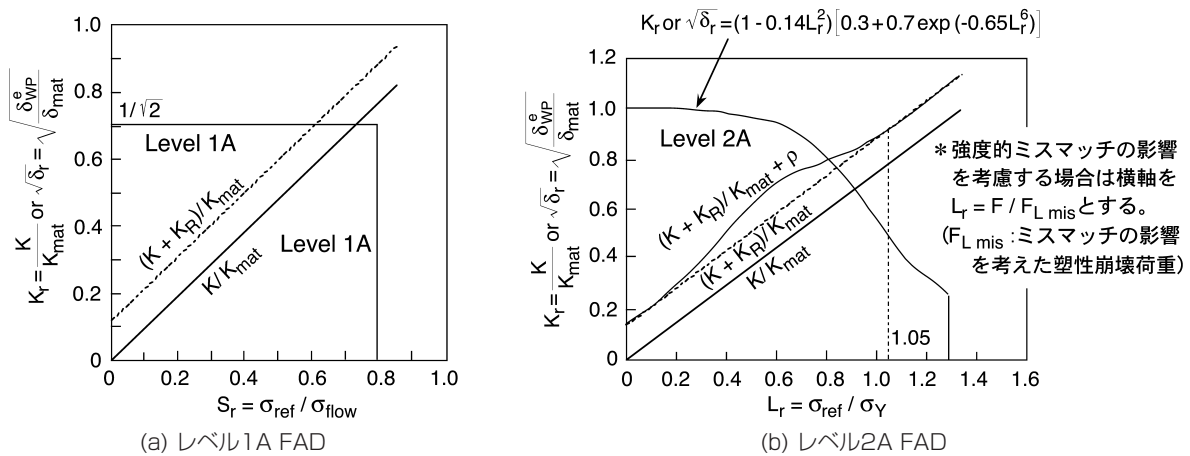


図6 残留応力の影響を考慮した BS7910 の破壊評価線図

($(\sigma_Y + \sigma_T) / 2$). Level 1A の評価は、旧 PD6493³⁾ と整合している。

Level 2 : Normal assessment

材料の応力-ひずみ曲線に関する情報がない場合 (Level 2A) と、ある場合 (Level 2B) に対して、FAC を次のように設定している。

Level 2A :

$$f(L_r) = (1 - 0.14L_r^2) [0.3 + 0.7 \exp(-0.65L_r^6)] \text{ for } L_r < L_{r,max} \quad \dots\dots(11)$$

Level 2B :

$$f(L_r) = \left[\frac{E \epsilon_{ref}}{L_r \sigma_Y} + \frac{L_r^3 \sigma_Y}{2E \epsilon_{ref}} \right]^{-1/2} \text{ for } L_r < L_{r,max} \quad \dots\dots(12)$$

ここで、 $L_r = \sigma_{ref} / \sigma_Y$ 、塑性崩壊限界 $L_{r,max} = (\sigma_Y + \sigma_T) / 2 \sigma_Y$ 、 E : 縦弾性係数、 ϵ_{ref} : 真応力-真ひずみ曲線上で σ_{ref} (ネット断面の平均作用応力 σ_{net}) に対応するひずみ。

Level 2 評価は、加工硬化の大きな材料や、延性き裂成長を伴う場合の破壊評価に向いている (式 (12) は Ainsworth の平面応力状態での J 積分の近似解²⁾ をベースにしている)。Level 2B を適用する場合は、材料の真応力-真ひずみ曲線が必要で、 σ_{ref} に対応する ϵ_{ref} は真応力-真ひずみ曲線より算出する。一方、Level 2A の FAC は、Level 2B の FAC を基礎として、種々の材料・部材形状に対して安全側の破壊評価となるように定式化されている。もし、Level 2B よりも精度の高い評価を行いたい場合 (Level 3 評価) には、当該構造部材の FAC を 3

次元弾塑性 FEM 解析で求める。

溶接継手の破壊評価を行うときには、破壊駆動力の K_r は次式で算定する。

$$\text{Level 1: } K_r = \sqrt{\delta_r} = \frac{K + K_R}{K_{mat}} \quad \dots\dots\dots(13-1)$$

$$\text{Level 2: } K_r = \sqrt{\delta_r} = \frac{K + K_R}{K_{mat}} + \rho \quad \dots\dots\dots(13-2)$$

ここで、 K : 外力による K 値, K_R : 溶接残留応力による K 値, ρ : 1 次応力と残留応力などの 2 次応力が存在する場合の塑性補正係数で、 $0 < L_r < 1.05$ では概ね $\rho < 0.2$, $1.05 \leq L_r$ では $\rho = 0$ (詳細は BS7910 の Annex R 参照)。 K_R の解析に用いる残留応力は、表 2 のように設定する。

溶接部の強度的ミスマッチは、継手の塑性崩壊荷重に影響を及ぼしうる。強度的ミスマッチの影響も考えた Level 2 評価を行う場合は (塑性崩壊に近い破壊モードを取り扱う場合と思われる), load ratio を $L_r = F / F_{Lmis}$ で評価する。ここで、 F_{Lmis} は強度的ミスマッチを有する場合の塑性崩壊荷重²³⁾。なお、破壊靱性値 K_{mat} も強度的ミスマッチの影響を受ける場合があるので、FAD 評価に適用する破壊靱性値 K_{mat} には注意が必要である旨がコメントされている (BS7910 Annex I)。

これらの因子の影響を考えた、溶接継手の破壊評価曲線を図 6 に概念的に示す。

4. 構造要素の破壊性能評価における拘束緩和補正 (ISO 27306)

4.1 従来の破壊力学的手法の問題点

上述した破壊力学的手法では、「破壊靱性試験片の破壊抵抗値 (破壊靱性値) = 構造要素の破壊抵抗値」とする破壊基準が一般に適用される。しかし、最近の製鋼技術の進歩によって多岐の特性をもつ鋼材が開発され、それらが適用される構造様式も変化に富むようになると、従来の破壊力学的手法では十分に対応しきれなくなってきた。それは、従来法によると過度に安全側の評価結果 (構造破壊性能の過小評価、または材料要求破壊靱性値の過大評価) となりがちなことである。この傾向は降伏比 (= 降伏応力/引張強さ) の高い高強度鋼において特に著しく、大型構造物への高強度鋼の適正利用を阻害する要因の一つになっている。

従来の破壊評価手法が過度に安全側の評価結果を与えがちなのは、破壊靱性試験片と構造要素の塑性拘束の違いを考慮していないことによる。破壊靱性試験片は曲げ荷重による中立軸の存在のために強変形領域がき裂先端近傍に限られ、周囲との変形差の大きな状態を示す。言い換えれば、き裂先端近傍の塑性域が周囲の弾性域に拘束された状態 (塑性拘束の強い状態) にある。これに対して、構造要素の負荷形態は主に引張で、塑性域が自由に発達できるため、き裂先端近傍の拘束が緩和されやすい (図 7)。このような拘束緩和によって、構造要素ではき裂先端近傍の応力レベルが破壊靱性試験片ほど高くなり、脆性破壊限界が見かけ上大きくなる。

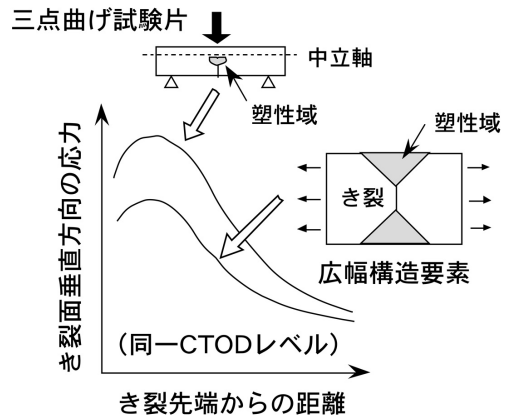


図7 広幅引張平板と破壊靱性試験片のき裂先端近傍の応力状態の比較 (広幅平板が大きな塑性域を伴う変形レベルでの比較)

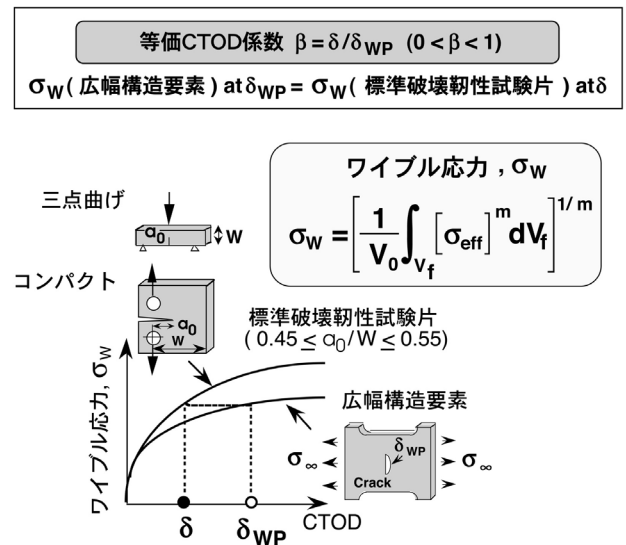


図8 等価 CTOD 比 β の定義²⁵⁾

この問題を打破し、き裂材の形状、寸法、負荷様式によらず材料固有の破壊抵抗値を評価できるパラメータとしてワイブル応力²⁶⁾が提案され、その有効性が検証されてきた²⁴⁾。しかし、ワイブル応力は 3 次元 FEM 解析を併用した数値解析を必要とし、一般の構造設計者、技術者には馴染み難い。そこで、図 8 に示すように、き裂をもつ構造要素と破壊靱性試験片が等価なワイブル応力を呈する CTOD の対応関係を考えた等価 CTOD 比²⁵⁾

$$\beta = \delta / \delta_{WP} \quad \dots\dots\dots(14)$$

ここで、 δ : 破壊靱性試験片の CTOD,
 δ_{WP} : 破壊靱性試験片と同ワイブル応力レベルとなる構造要素の CTOD

が提案され、その工業化を図った手法²⁶⁾が 2009 年 5 月に ISO 規格 (ISO 27036¹⁰⁾) として誕生した。

本規格は、経済産業省基準認証研究開発事業「鉄鋼材料の破壊靱性評価手順の標準化、IST プロジェクト」(期間: 2002 年 11 月 ~ 2005 年 3 月, プロジェクトリーダー: 南二三吉, 研究開発実施団体: 助金属系材料研究開発センター) の成果をもとに規格化をはかったもので、プロジェクト名称にちなんで IST 手法と呼んでいる。以下、その概要を述べる。

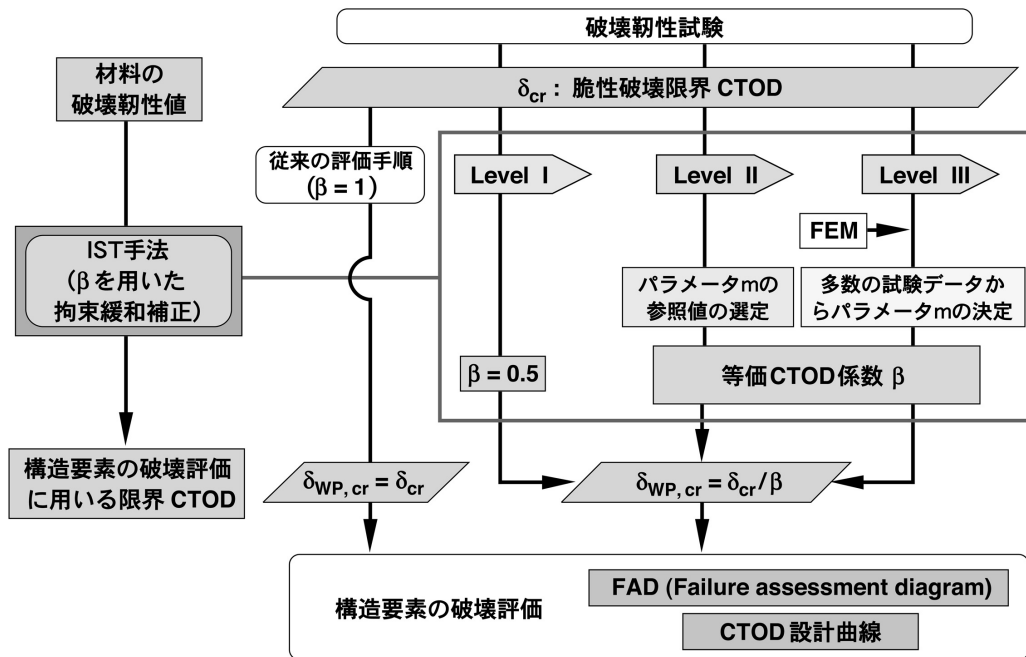


図9 CTOD 破壊靱性値の拘束緩和補正手法 (IST method)²⁶⁾

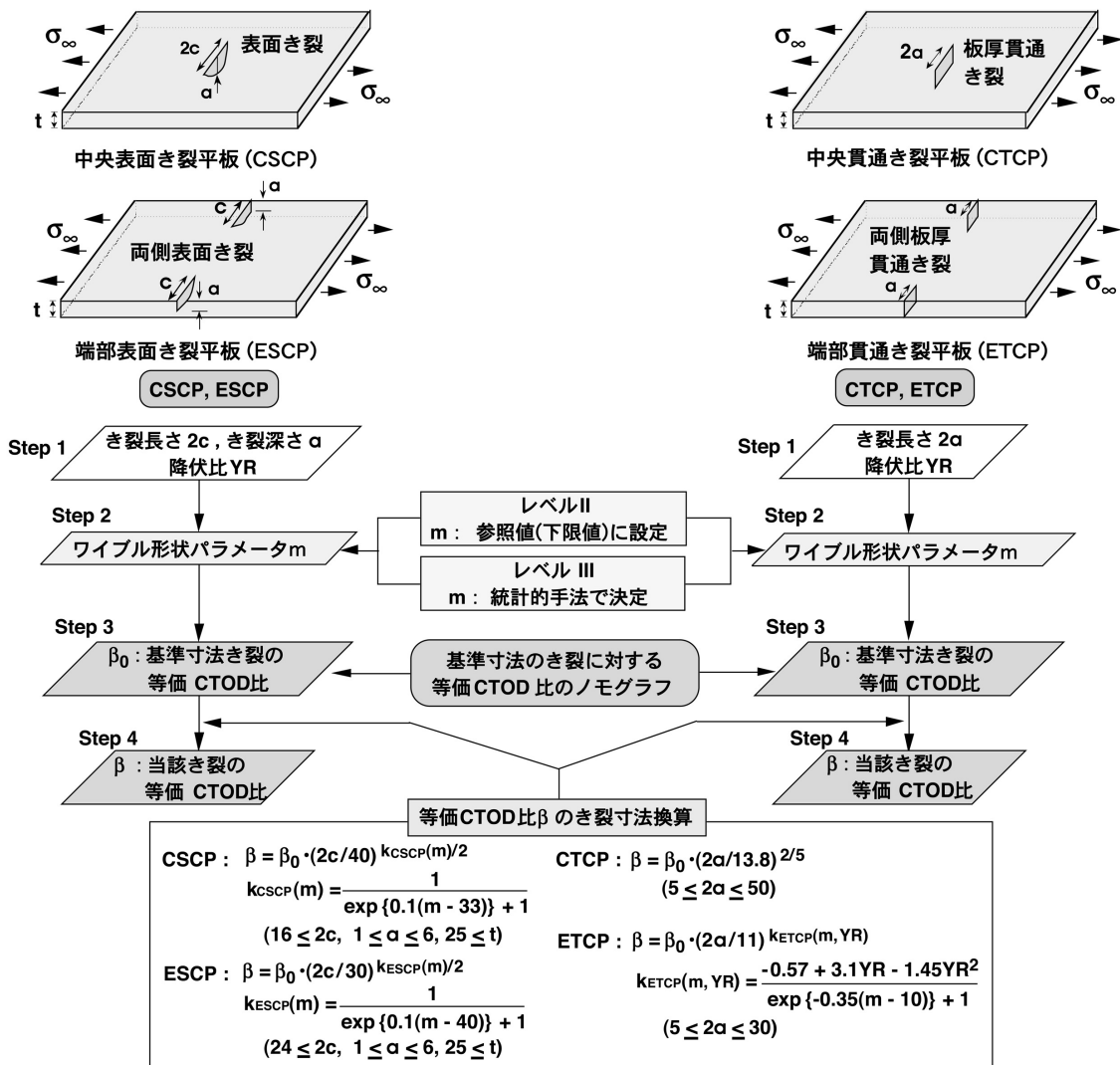


図10 等価 CTOD 比 β の算定フロー (レベル II, III 評価)²⁶⁾

4.2 ISO27306 の骨子

ISO 27036 (IST 手法) は、脆性破壊が問題となる鋼構造物全般を対象とし、標準破壊靱性試験片 ($0.45 \leq a_0/W \leq 0.55$ の三点曲げ、あるいは、コンパクトタイプの破壊靱性試験片、 a_0 : 疲労予き裂を含む初期き裂長さ、 W : 試験片幅) で得られる CTOD 破壊靱性値を、構造要素の等価な限界 CTOD (破壊駆動力としてのワイブル応力が等価な CTOD) に換算する手順、あるいはその逆手順を与えるものである。破壊駆動力が等価な CTOD への換算は、等価 CTOD 比 β を用いて行う。

構造要素としては、広幅引張平板とみなせるような、部材寸法 (長さ、幅) に比べて十分小さいき裂をもつ次の 4 タイプの構造要素を対象とする。

CSCP (中央表面き裂平板): 第 3 者による表面傷を想定した広幅構造要素

ESCP (端部表面き裂平板): 部材端部の幾何学的応力集中部から疲労や地震による繰返し荷重で生じる表面き裂を想定した広幅構造要素

CTCP (中央貫通き裂平板): 中央表面き裂平板でき裂が十分深くなったものを想定

ETCP (端部貫通き裂平板): 端部表面き裂平板でき裂が十分深くなったものを想定

ESCP, ETCP は、両側き裂と片側き裂の双方を対象としている。溶接構造物では融合不良やアンダカット、割れなどの溶接欠陥が想定き裂の代表的なものであるが、溶接継手では強度的不均質や残留応力の影響を考慮が必要があるので、現時点では溶接継手は取り扱っていない。

等価 CTOD 比 β は、き裂寸法・形状や材料の降伏比 YR などの関数としてノモグラフで与えて標準化している。 β は、 $0 < \beta < 1$ の範囲にあり、降伏比 YR の高い鋼材 (高強度鋼)、靱性レベルの高い鋼材 (厳密には形状パラメータ m の大きな鋼材) ほど小さくなる傾向にある (従来の評価手法では常に $\beta = 1$)。

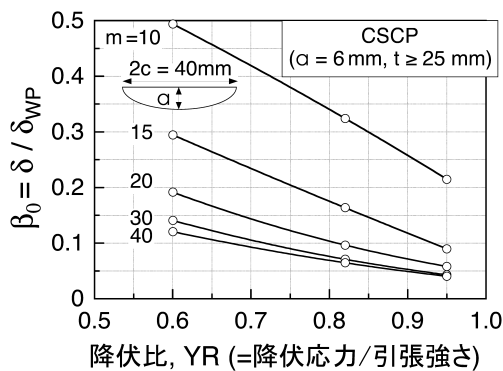
等価 CTOD 比 β を用いると、構造要素の破壊限界 CTOD, $\delta_{WP,cr}$ は、破壊靱性試験片の限界 CTOD, δ_{cr} から $\delta_{WP,cr} = \delta_{cr}/\beta$ と算定され、これによって構造要素の塑性拘束緩和を補正した破壊評価が行える。また、想定欠陥に対して構造要素が破壊しないための必要破壊靱性 δ_{cr}^R (標準破壊靱性試験片の必要限界 CTOD) は、構造要素の必要抵抗 $\delta_{WP,cr}^R$ から $\delta_{cr}^R = \beta \cdot \delta_{WP,cr}^R$ と算出され、従来よりも合理的な破壊靱性要求が可能となる。

図 9 に、この手法の位置づけを、破壊靱性試験結果から構造要素の破壊性能を評価するフローを例にとって示す。破壊靱性試験は既存の手順 (ISO 12135 など) に従って行い、構造要素の破壊性能評価には各国で十分にオーソライズされた方法を適用する。

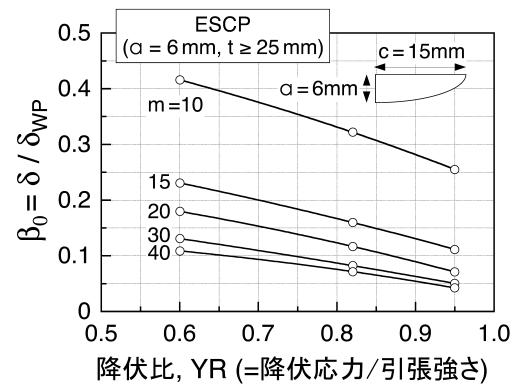
4.3 等価 CTOD 比 β の評価レベルと算定手順

等価 CTOD 比 β の算定には、鋼材の機械的性質や想定き裂の寸法などの情報が必要で、本規格では次の 3 段階の評価レベルを設定している。どの評価レベルを適用するかは、当事者間の合意による。

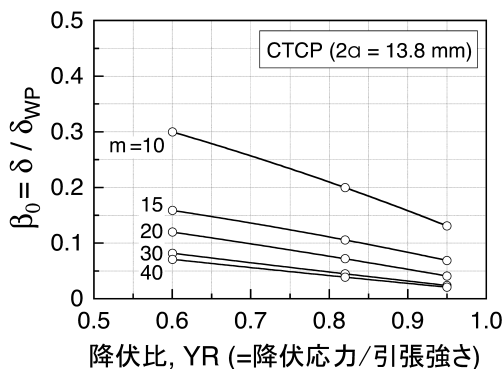
レベル I: 簡易評価レベル。評価対象の構造要素について β を算定するのに必要な情報が必ずしも全て得られていない場合に該当。構造要素の塑性拘束緩和を小さめに



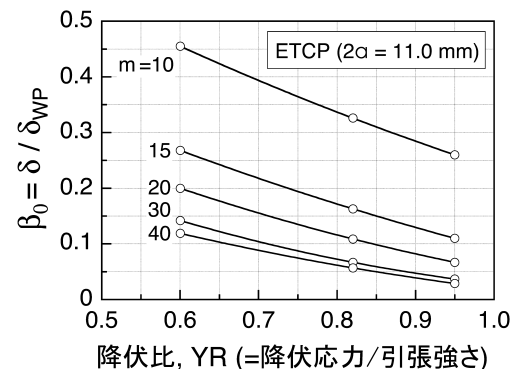
(a) CSCP 広幅平板



(b) ESCP 広幅平板 (両側き裂)



(c) CTCP 広幅平板



(d) ETCP 広幅平板 (両側き裂)

図 11 広幅平板の等価 CTOD 係数 β_0 のノモグラフの例²⁶⁾

見積もって、 β を0.5と設定する（非常に特殊な場合を除き安全側の評価）。

レベル II：標準の評価レベル。当該構造要素の機械的特性（降伏比 YR）、形状パラメータ m 、想定き裂のタイプ・寸法に応じて、ノモグラフを用いて β を算定。このとき、パラメータ m には参照値を適用し、破壊評価結果が安全側となるように m を材料の下限的な値に設定する（材料の限界 CTOD の平均値、 $\delta_{cr} < 0.05 \text{ mm}$ のときは $m=10$ 、 $\delta_{cr} \geq 0.05 \text{ mm}$ のときは $m=20$ とする。材料の限界 CTOD は、厚さ 25 mm の試験片に換算して評価）。レベル II では、おおむね $0 < \beta < 0.5$ 。

レベル III：材料の形状パラメータ m に応じた評価レベル。 m が既知、あるいは、十分な数の破壊靱性試験データから統計的手法（最尤推定法）で m 値を決定できる場合に該当。レベル II と比較すると、 β （レベル III） $< \beta$ （レベル II）となる。

等価 CTOD 比 β は、図10に示すように、次の手順で算定する（レベル I 評価では $\beta=0.5$ と与えるので、以下ではレベル II, III 評価の手順を記載）。

ステップ 1：対象構造要素のき裂タイプ、き裂寸法、材料の降伏比 YR を設定する。

ステップ 2：形状パラメータ m を設定する。レベル II では m を材料の下限的な値に設定する（板厚 25 mm 換算の平均限界 CTOD、 $\delta_{cr} < 0.05 \text{ mm}$ の場合は $m=10$ 、 $\delta_{cr} \geq 0.05 \text{ mm}$ の場合は $m=20$ ）。本規格の Annex A に各種鋼材の限界 CTOD とパラメータ m の関係を記載。レベル III では、十分な数の破壊靱性試験データから統計的手法（最尤推定法）で m 値を決定する。Annex B に m 値の決定手順を記載。

ステップ 3：き裂タイプに応じたノモグラフ（図11）から、基準寸法のき裂の等価 CTOD 比 β_0 を読みとる。（等価 CTOD 比 β はき裂寸法にも依存するので、ノモグラフは基準寸法のき裂に対して与えている。）

ステップ 4： β_0 をもとに、図10のき裂長さ換算式（数値解析結果を基に設定）で当該き裂の等価 CTOD 比 β を計算する。

4.4 規格の適用範囲

ISO 27036（IST 手法）は、構造用鋼の脆性破壊を対象とし、以下の条件・範囲で等価 CTOD 比 β を標準化している。

- ・破壊靱性試験片：初期き裂長さ a_0 （機械切欠き長さ）と疲労予き裂長さの合計寸法）と試験片幅 W の比が $0.45 \leq a_0/W \leq 0.55$ の標準三点曲げ試験片、もしくは、コンパクト試験片を用いる。破壊靱性試験片の厚さは、構造要素の材料厚さに等しいとする。
- ・材料の破壊靱性レベル：破壊靱性試験片が巨視的に延性き裂成長を伴わずに脆性破壊する範囲（延性き裂長さ $\leq 0.2 \text{ mm}$ ）を対象とする（ただし、小規模降伏で破壊する極低い靱性レベルは除く）。
- ・構造要素：き裂寸法に比べて十分広幅とみなせる引張平板要素を対象とする。き裂タイプは、中央貫通き裂

（CTCP）、中央表面き裂（CSCP）、端部貫通き裂（ETCP）、端部表面き裂（ESCP）の4タイプ。

- ・き裂寸法：CTCP, CSCP, ETCP, ESCP の各き裂に対して、次の範囲で等価 CTOD 比 β を決定できるノモグラフを与えている。

CSCP: $2c \geq 16 \text{ (mm)}, 1 \leq a \leq 6 \text{ (mm)}, t \geq 25 \text{ (mm)}$

ESCP: $2c \geq 24 \text{ (mm)}, 1 \leq a \leq 6 \text{ (mm)}, t \geq 25 \text{ (mm)}$

CTCP: $5 \leq 2a \leq 50 \text{ (mm)}$

ETCP: $5 \leq 2a \leq 30 \text{ (mm)}$

ここで、 $2c$ ：表面き裂長さ、 a ：表面き裂深さ、 $2a$ ：板厚貫通き裂長さ、 t ：材料の厚さ。

- ・材料の降伏比 YR：YR=0.6~0.95 の範囲で β をノモグラフ化している。

- ・材料のワイブル形状パラメータ m ： $m=10\sim 50$ の範囲で β をノモグラフ化している。 m は材料定数で、本規格では Annex A もしくは Annex B で破壊靱性試験結果から m 値を決定する手順を与えている。

4.5 適用例

ISO 27036（IST 手法）を適用して、FAD 法によって 400~780 MPa 級構造用鋼の広幅引張試験体（CTCP, CSCP, ESCP）の脆性破壊強度を破壊靱性試験結果から評価した結果¹¹⁾を図12に示す。なお、破壊評価曲線 FAC

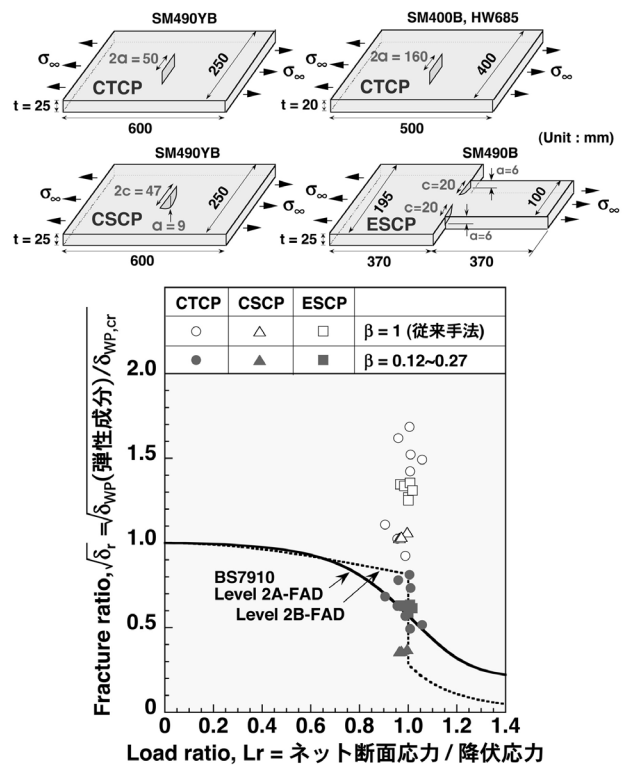


図12 広幅引張平板の脆性破壊性能評価（FAD 評価）への ISO27306 の適用

- 注1：ISO27306 では等価 CTOD 比 β の算定に3レベルを設定しているが、ここではレベルII評価を適用。
- 注2：材料の破壊靱性値（破壊靱性試験片の限界 CTOD、 δ_{cr} ）には3本の試験結果の最低値、もしくはそれに相当する値を使用。
- 注3：BS7910 Level 2B-FAD 曲線の設定には材料の応力-ひずみ曲線が必要で、ここでは 490 MPa 級鋼材の応力-ひずみ曲線を用いた FAD 曲線を表示。

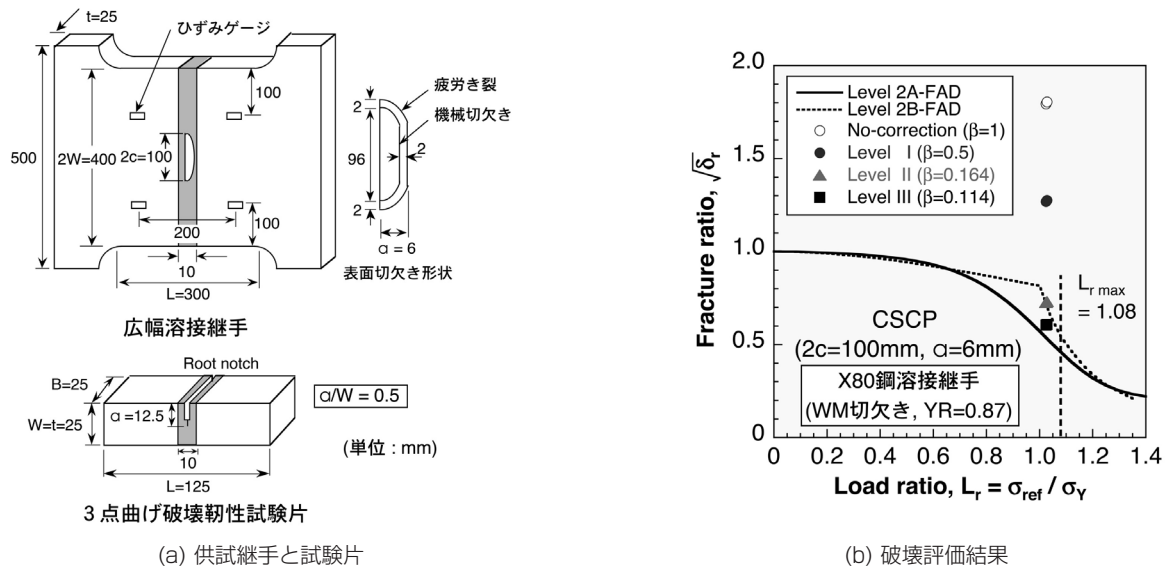


図13 等価 CTOD 係数 β を適用した X80 鋼溶接継手の FAD 評価⁽²⁸⁾

には、英国規格 BS7910-2005 のレベル 2A、および、レベル 2B の破壊評価曲線を用いた。従来の評価手法 ($\beta = 1$: 構造要素の破壊抵抗値 = 破壊靱性試験片の破壊抵抗値とする手法) では、破壊評価点が破壊曲線よりもかなり上側に位置し評価精度が悪いのに対して、IST 手法を適用して広幅試験体の破壊抵抗値を $\delta_{wp,cr} = \delta_{cr} / \beta$ と算定すると、破壊評価点が破壊曲線周辺に集まっているのがわかる。すなわち、従来手法に比べて高精度な破壊評価ができています。なお、図12の例では、等価 CTOD 比 β は 0.12~0.27 であり (β の値は各鋼材の降伏比、き裂タイプ、き裂寸法による)、広幅試験体は破壊靱性試験片よりも約 4 倍~8 倍 ($=1/\beta$) 大きな CTOD で脆性破壊することを意味している。

ISO 27036 (IST 手法) は、構造要素の脆性破壊評価における拘束緩和補正を取り扱っているが、その後の研究⁽²⁹⁾により、溶接継手で母材と溶接金属の強度差が $\pm 20\%$ 程度までであれば、溶接金属や熱影響部にき裂をもつ場合にも、ISO 27036 の等価 CTOD 比 β は第一近似としてほぼそのまま適用できることが示された。これは、き裂先端近傍の応力場は母材と溶接部の強度的ミスマッチの影響を受けるものの、その影響は破壊靱性試験片にも構造要素継手にも同様に現れるので、等価 CTOD 比 β でみると強度的ミスマッチの影響が分母分子でキャンセルされることによる。図13は、ISO 27036 の等価 CTOD 比 β を適用して、ラインパイプ用 X80 鋼 (API 5L) 広幅溶接継手の破壊性能を破壊靱性試験結果から評価したものである⁽²⁸⁾。従来の破壊力学的手法 ($\beta = 1$) では、広幅溶接継手の破壊性能が過度に安全側に評価されているのに対し、等価 CTOD 係数 β を適用すると、評価結果が破壊曲線 (FAC) の近くに位置し、合理的な破壊評価ができていくのがわかる。

なお、ワイブル応力を用いた破壊評価手法とその破壊評価規格への導入については一連の文献^(24, 29-31)で解説しているのを参照されたい。

参考文献

- 1) 日本溶接協会規格, WES 2805-2007: 溶接継手の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, (2007).
- 2) F. M. Burdekin and D. E. W. Stone: The Crack Opening Displacement Approach to Fracture Mechanics in Yielding Materials, Journal of Strain Analysis, 1, No.2 (1966), pp.145-153.
- 3) BSI, PD6493: Guidance on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Fusion Welded Structures, (1980).
- 4) BSI, BS7910-2005: Guide on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures, (2005).
- 5) R. P. Harrison, K. Loosemore and I. Millne: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, CEBG Report R/R/R6, (1976).
- 6) R6 - Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, British Energy, Generation Report R6 Revision 4, Including Amendment 7, (2009).
- 7) FITNET, Fitness-for-Service (FFS), Revision MK8, Vol.1 - Procedure, Edited by M. Koçak, S. Webster, J. J. Janosch, R. A. Ainsworth, R. Koers, GKSS Research Center, (2008).
- 8) FITNET, Fitness-for-Service (FFS), Revision MK8, Vol.2 - Annex, Edited by M. Koçak, I. Hadley, S. Szavai, Y. Tkach, N. Taylor, GKSS Research Center, (2008).
- 9) SINTAP, Structural Integrity Assessment Procedure for European Industry, Project BE95-1426, Final Procedure, British Steel Report, Rotherham, (1999).
- 10) API/ASME, API 579-1/ASME FFS-1 2007, Fitness-for-Service, (2007).
- 11) ISO 27306: Method of Constraint Loss Correction of CTOD Fracture Toughness for Fracture Assessment of Steel Components, (2009).
- 12) 日本溶接協会規格, WES 1108-1995: き裂先端開口変位 (CTOD) 試験方法, (1995).
- 13) 日本溶接協会規格, WES 1109-1995: 溶接熱影響部 CTOD 試験方法に関する指針, (1995).
- 14) ISO 12135: 2002(E): Metallic Materials - Unified Method of Test for the Determination of Quasistatic Fracture Toughness, (2002).
- 15) BSI, BS7448 Part 1-1991: Fracture Mechanics Toughness Tests, Method for Determination of K_{Ic} ,

- Critical CTOD and Critical J Values of Metallic Materials, (1991).
- 16) BSI, BS7448 Part 2-1997: Fracture Mechanics Toughness Tests, Method for Determination of K_{Ic} , Critical CTOD and Critical J Values of Welds in Metallic Materials, (1997).
 - 17) S. Slatcher: The Estimation of Characteristics Fracture Toughness Values, Veritas Research Technical Report, (1986).
 - 18) 橋本, 田沼: 限界状態設計法による鋼構造建築の溶接接合設計, 溶接学会誌, 59, No.8, (1990), pp.579-584.
 - 19) D. D. Dugdale: Yielding of Steel Sheets Containing Slits, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 8 (1960), pp.100-104.
 - 20) H. Tada, P. C. Paris and G. R. Irwin: The Stress Analysis of Cracks Handbook, Dell Research Corporation, Hellertown, Pennsylvania, U.S.A. (1973).
 - 21) R. A. Ainsworth: The Assessment of Defects in Structures of Strain Hardening Materials, Engineering Fracture Mechanics, 19, No.4 (1984), pp.663-642.
 - 22) Y. Ley and R. A. Ainsworth: J Integral Estimation Method for Cracks in Welds with Mismatched Mechanical Properties, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 70, No.3 (1997), pp.237-245.
 - 23) F. M. Beremin: A Local Criterion for Cleavage Fracture of a Nuclear Pressure Vessel Steel, Metallurgical Transactions A, 14A (1983), pp.2277-2287.
 - 24) 南二三吉: ワイブル応力を用いた破壊評価手法 - Part I, 溶接学会誌, 75, No.5 (2006), pp.416-446.
 - 25) F. Minami, T. Katou, T. Nakamura and K. Arimochi: Equivalent CTOD Concept for Fracture Toughness Requirement of Materials for Steel Structures, Proc. 18th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, St. John's, Newfoundland, OMAE99/MAT-2130, (1999).
 - 26) F. Minami, M. Ohata, H. Shimanuki, T. Handa, S. Igi, M. Kurihara, T. Kawabata, Y. Yamashita, T. Tagawa and Y. Hagihara: Method of Constraint Loss Correction of CTOD Fracture Toughness for Fracture Assessment of Steel Components, Engineering Fracture Mechanics, 73 (2006), pp.1996-2020.
 - 27) F. Minami, M. Ohata, T. Manabe, Y. Chiba and K. Murayama: Significance of Strength Mismatch in Fracture Performance Evaluation of Welded Joints - Characterization of Mismatch Effect by the Weibull Stress Criterion -, Welding in the World, Vol.53, No.5/6 (2009), pp.140-150.
 - 28) F. Minami, M. Ohata and D. Watanabe: Fracture Assessment Procedure for Structural Components under Cyclic and Dynamic Loading, International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol.18 (2008), pp.196-203.
 - 29) 南二三吉: ワイブル応力を用いた溶接構造物の破壊評価手法, 溶接技術, 第53巻, 第9号, (2005), pp.71-82.
 - 30) 南二三吉: ワイブル応力を用いた破壊評価手法 - Part II, 溶接学会誌, 75, No.6 (2006), pp.482-516.
 - 31) 南二三吉: ワイブル応力を導入した新しい破壊評価規格, 配管技術, 49, No.5 (2007), pp.11-27.
-