

TODAY

理事長就任のご挨拶



財団法人 金属系材料研究開発センター
理事長 武田 安夫

(新日本製鐵(株)代表取締役副社長)

このたび、財団法人金属系材料研究開発センターの理事会において、理事各位のご推挙により、理事長に就任いたしました。

当センターは、1985年に創立され、現在推進中の「鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発」や「窒化物系化合物半導体材料」など、将来の環境問題をも見越した数多くの優れた金属系材料および製造プロセスの基盤技術開発に取り組んでまいりました。この間、当センターの運営と発展に尽された諸先輩並びに会員各位に深く敬意を表したいと思います。

平成18年度から22年度までの第三期科学技術基本計画も後半に入り、その実を示す段階になりつつあります。また、2012年までの京都議定書の第一約束期間に入り、「Cool Earth エネルギー革新技術計画」の推進など、科学技術が果たさなければならぬ課題が山積されていると言っても過言ではありません。

一方で、米国に端を発した世界的な経済問題は我が国の金属産業にも大きな影響を与えております。しかしながら、本年1月に発表された経済財政諮問会議の「経済財政の中長期方針と10年展望」

にも示されているように、低炭素社会の実現、人材の活用、安全安心な社会、活力と独自性のある地方、世界をリードする新しいアジア、等のシナリオを実現して行くことが我が国には必要であり、特に、そのシナリオの構築には昨年9月に閣議決定された「新経済成長戦略」を基礎として具体化を図ることが必要とされています。そのためにも、基礎素材である金属産業が今こそ将来に向けて地に足をつけた技術開発への取り組みを示すべき時ではないかと思っております。

この中でも人材育成に関しては、JRCMでは昨年度から「アルミニウム圧延品製造プロセス技術伝承・中核人材育成プロジェクト」と「鉄鋼分野における産学人材育成パートナーシッププロジェクト」に取り組み、関係大学・企業の皆様のご協力の下、国が示した「産学人材育成パートナーシップ」構想の実を挙げるべく活動を行っております。今後更に関係先の皆様のご協力をいただき、金属産業分野での画期的な人材育成の仕組みを提案していきたいと考えております。

今後の経済環境の推移は予断を許さないところがあります。自動車産業などを始めとする我が国の製造業が早期に復活し、国際競争に打ち勝ち、更に発展するためには、製造業を支える基礎素材である金属系材料の開発を、より一層強固なものとして行うことが必須であると考えております。本質的な課題解決が必ずや新たな世界を示すはずです。

このような研究開発を推進するため、経済産業省を始めとする関係機関のご指導並びに会員各位のご協力により、当センターの使命達成に貢献できますよう、微力ながら尽力いたす所存であります。

今後、一層のご支援とご協力をお願いいたしまして、就任のご挨拶とさせていただきます。

日本から提案した世界初の破壊評価 ISO 規格
 ISO 27306 Metallic materials
 - Method of constraint loss correction of CTOD fracture toughness for fracture assessment of steel components
 「鋼構造物の破壊性能評価のための CTOD 破壊靱性値の塑性拘束補正手法」
 南 二三吉 (大阪大学大学院工学研究科)

【概要】

我が国から提案した破壊評価手順 ISO/FDIS 27306 が、2009 年 4 月 23 日の最終投票で満場一致で可決され、ISO 規格として誕生することとなった。この規格は、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」(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：(財)金属系材料研究開発センター)の成果を基に原案作成し、ISO TC164/SC4F 委員会に提案していたもので、構造要素と破壊靱性試験片(小型材料試験片)の間の塑性拘束差を補正し、破壊靱性試験結果から構造破壊性能(脆性破壊強度)を高精度で評価可能とするものである。これにより、従来手法の問題点であった過度に安全側に評価される傾向が合理的に排除される。本手法の適用メリットは、特に降伏比 YR (= 降伏応力 / 引張強さ)の高い高強度鋼に対して大きく、高強度鋼の大型構造への適用拡大に資することが期待される。本規格は、金属材料の機械試験を取り扱う TC164 委員会では初めての、試験結果の応用分野に関する規格である。(先月の JRCM ニュースに速報、詳しい内容は文献 1) ~3) を参照。)

【背景】

構造物の破壊安全性の評価には、応力拡大係数 K や J 積分、き裂先端開口変位 CTOD, δ などのパラメータを用いる破壊力学的手法が適用され、破壊駆動力 (K, J, δ) が材料の破壊抵抗値 (K_c, J_c, δ_c) を上回れば不安定破壊が発生する。破壊抵抗値(破壊靱性値: K_c, J_c, δ_c) は、小型の試験片を用いた破壊靱性試験によって求められ、その試験手順は ISO や欧米の機関によって規格化されている(例えば ISO 12135)。また、構造要素の破

壊評価法も、破壊評価線図 (Failure assessment diagram, FAD) や CTOD 設計曲線など、各国の機関で規格化・オーソライズされている。

上記の破壊基準で破壊評価を行う場合、一般に「構造要素の破壊抵抗値 = 破壊靱性試験片の破壊抵抗値」が前提となっている。しかし、破壊力学パラメータは 2 次元き裂(原則として平面ひずみ状態の貫通き裂)を対象に開発されているので、現実のき裂材に適用すると、破壊抵抗値 (K_c, J_c, δ_c) はき裂寸法や負荷様式などの影響を受け、「構造要素の破壊抵抗値 > 破壊靱性試験片の破壊抵抗値」となりやすい。この傾向は、降伏比の高い高強度鋼で特に著しく、高強度鋼の大型構造への適用拡大阻害要因の一つになっている。

これは、図 1 (右下部) に示すように、き裂先端付近の塑性域の発達様式の違いに起因する。すなわち、破壊靱性試験片は曲げ負荷モードにあり、き裂前方の中立軸の存在が塑性域の拡大を抑制する(塑性拘束が強い)のに対し、構造要素は主

に引張負荷モードにあり、塑性域が自由に発達できるので拘束が緩和されやすい。このような拘束緩和によって、構造要素はき裂先端近傍の応力レベルが破壊靱性試験片ほども高くなり、脆性破壊限界が見かけ上大きくなる。このため、従来手法で破壊評価を行うと、構造破壊性能を実際よりも過小に(過度に安全側に)見積もり、また、構造設計側からは、破壊安全性確保のために過度に大きな材料破壊靱性値を要求する傾向にある。

【規格の構成と骨子】

本規格の構成は次のようである。規格本体

1. 主旨
2. 参照すべき規格類
3. 用語と定義
4. 記号と単位
5. 規格骨子
6. 評価の対象とする構造要素
7. 評価レベル I, II, III
8. 等価 CTOD 比 β

Annex

Annex A レベル II 評価でのワイ

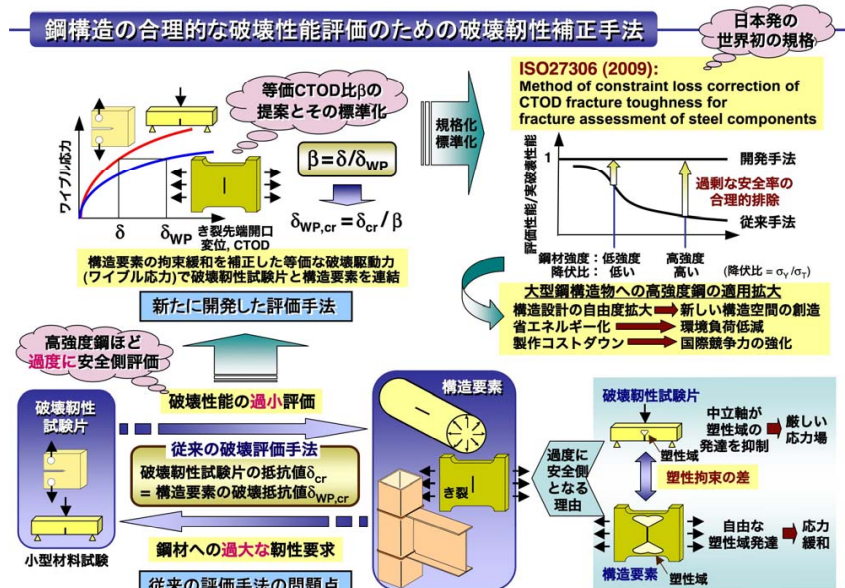


図 1 ISO27306 の背景と特徴

ブル形状パラメータ m の設定法

Annex B レベル III 評価でのワイブル形状パラメータ m の決定法

Annex C 等価 CTOD 比 β のガイドライン

Annex D 等価 CTOD 比 β を用いた破壊評価例

本規格は、破壊駆動力としてワイブル応力 (図 2) を用い、破壊靱性試験片と構造要素が等価なワイブル応力を呈する CTOD 比 (これを等価 CTOD 比 β と定義) を標準化している (図 1 (上部))。

ワイブル応力 $\sigma_W = \left[\frac{1}{V_0} \int_{V_f} [\sigma_{\text{eff}}]^m dV_f \right]^{1/m}$

m : ワイブル形状パラメータ
 V_0 : 破壊基本体積
 σ_{eff} : 有効応力

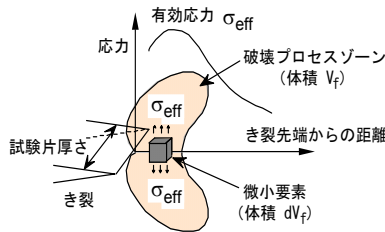


図 2 ワイブル応力の定義 (破壊プロセスゾーンはほぼ引張塑性域に相当)

ワイブル応力とは、「脆性破壊に寄与するき裂先端近傍の応力を、破壊に対する重みを考えて積分したパラメータ」で、脆性破壊時の限界ワイブル応力はき裂材の寸法や形状、荷重様式に依存しないという利点がある²⁾。本規格はこの特性に注目し、構造要素と破壊靱性試験片が同じワイブル応力を呈するように、両者を等価 CTOD 比 β を用いて連結する。しかしながら、ワイブル応力の計算には 3 次元 FEM 解析を併用した特殊な数値計算が必要で、一般の設計者・技術者には馴染み難い。そこで、本規格では、代表的な構造要素についてワイブル応力をあらかじめ計算し、等価 CTOD 比 β を、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いる。 β の値は、おおむね $0 < \beta < 0.5$ の範囲にあり、降伏比 YR の高い鋼材 (高強度鋼)、破壊靱性の高い鋼材 (厳密にはワイブル形状パラメータ m の大きな鋼材) ほど小さくなる傾向にある (図 3)。

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。

【規格の適用範囲】

本規格は、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 $a_0/W = 0.5$ 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：破壊靱性試験片が明らかな延性き裂成長を伴わずに脆性破壊する範囲を対象とする (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 を決定できるようにしている。

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

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

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

ETCP: $5 \leq 2a \leq 30$ (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

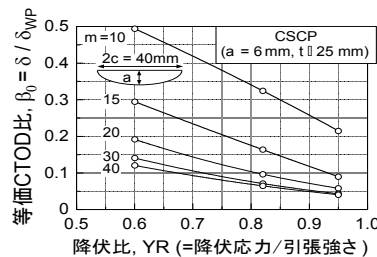


図 3 等価 CTOD 比 β のノモグラフの例 (き裂長さ $2c = 40$ mm, き裂深さ $a = 6$ mm の中央表面き裂 (基準寸法) をもつ引張平板)
 * このようなノモグラフを中央貫通き裂 (CTCP), 中央表面き裂 (CSCP), 端部貫通き裂 (ETCP), 端部表面き裂 (ESCP) の 4 タイプの広幅引張平板に対して構築

長さ、 t : 材料の厚さ。

・材料の降伏比 YR: YR = 0.6 ~ 0.95 の範囲で等価 CTOD 比 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 : $m = 10 \sim 50$ の範囲で等価 CTOD 比 β をノモグラフ化している。 m 値は材料定数で、本規格では Annex A もしくは B で破壊靱性試験結果から決定できる手順を与えている。

【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見積もって、 β を大きめに 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 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, $\delta_{cr} < 0.05$ mm のときは $m = 10$, $\delta_{cr} \geq 0.05$ mm のときは $m = 20$ とする。材料の限界 CTOD は、厚さ 25mm 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 4 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

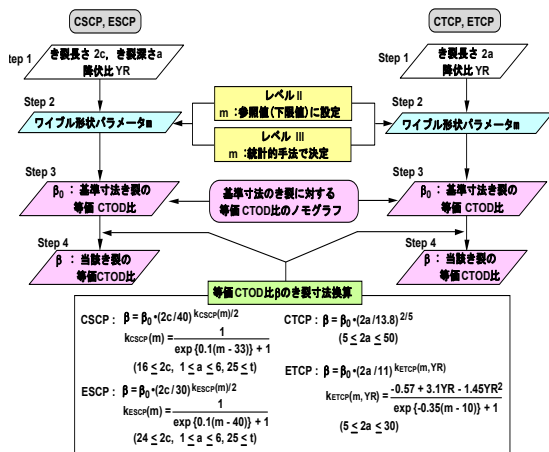


図4 等価CTOD比 β の算定フロー（レベルII,III評価）

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25mm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 $m = 20$ ）。

Annex Aにこの手順を記載。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（例えば図3）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、ノモグラフはある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4のき裂長さ換算式で当該き裂の等価CTOD比 β を計算する。

【適用例】

本規格を適用して、400～780MPa級構造用鋼の広幅引張試験体（CTCP, CSCP, ESCP）の脆性破壊性能を破壊靱性試験結果から評価した結果を図5に示す（個々の試験体の具体的な評価手順はAnnex Dに記載）。なお、破壊評価にはFAD (Failure assessment diagram) を使い、図中には英国規格BS7910-2005の破壊評価曲線を描いている。従来の評価手法（ $\beta =$

1：構造要素の破壊抵抗値 $\delta_{WP,cr}$ = 破壊靱性試験片の破壊抵抗値 δ_{cr} とする手法）では、 $\delta_{WP,cr}$ を過小に評価するので破壊評価点が破壊曲線よりもかなり上側に位置しているのに対して、本規格を適用して広幅試験体の破壊抵抗値を $\delta_{WP,cr} = \delta_{cr} / \beta$ と評価すると、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

【波及効果】

本規格は、降伏比の高い高強度鋼ほど適用のメリットが大きく（降伏比が高いほど等価CTOD比 β が小さくなって、従来法の過剰な安全側評価傾向が排除されるため）、我が国が世界の先端をいく高級鋼材の大型構造物への適正な利用拡大につながる事が期待される。それによって、従来できなかった構造空間設計が可能となり、軽量化による省エネルギー・省資源化の観点からも優位性を発揮する。本規格が、鉄鋼、重工、機械、エンジニアリング等の我が国の製造業の国際競争力を支える一助となれば幸いである。

ISO規格化事業には、経済産業省はもとより、(財)金属系材料研究開発センター（研究開発実施団体）、(財)日本規格協会、(社)

日本溶接協会鉄鋼部会、および、規格化プロジェクトメンバー（中立機関、鉄鋼メーカー、ファブリケータ）各位より格別のご支援とご高配を賜った。ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 南二三吉：ワイブル応力を用いた破壊評価手法 (Part I, Part II)，溶接学会誌，第75巻，第5号（2006），pp.416-446，第75巻，第6号（2006），pp.482-516.
- 3) 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，第49巻，第5号（2007），pp.11-27.

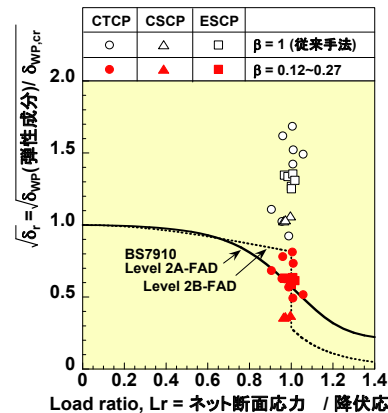
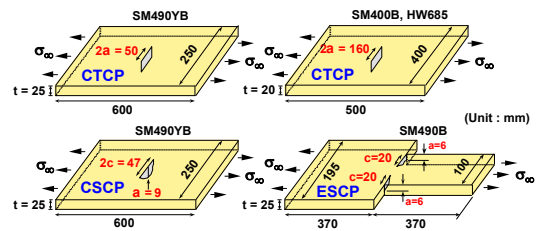


図5 広幅引張平板の脆性破壊性能評価（FAD評価）

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490MPa級鋼材の応力-ひずみ曲線を用いたFAD曲線を表示。

The Japan Research and Development Center for Metals
JRCM NEWS / 第273号
 内容に関するご意見、ご質問は JRCM 総務企画部までお寄せください。
 本書の内容を無断で複製・複製・転載することを禁じます。

発行 2009年7月1日
 発行人 小紫正樹
 発行所 財団法人 金属系材料研究開発センター
 〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目5番11号 第11 東洋海事ビル6階
 TEL (03)3592-1282 (代) / FAX (03)3592-1285
 ホームページ URL http://www.jrcm.or.jp/
 E-mail jrcm@oak.ocn.ne.jp