

## TODAY

## 鉄鋼材料の破壊力学研究はまだまだ奥深い



大阪大学大学院工学研究科

教授 南 二三吉

破壊力学はご承知のように、Griffithが1920年代にガラスのような弾性体の破壊を取り扱ったのが最初で、それ以降、米国戦時標準船の脆性破壊事故を契機として研究が本格化した。これまでに破壊評価パラメータがいくつか提案されているが、現在広く市民権を得ているのは、Irwinによる応力拡大係数 $K$ (1958年)、Wellsによるき裂先端開口変位CTOD(1960年の提案当時はき裂開口変位COD)、Riceによる $J$ 積分(1968年)の3つで、ISOをはじめ各国主要機関の破壊靱性試験法や破壊評価手順に取り入れられている。これらの試験法や評価手順は、鋼構造物の脆性破壊の防止に大きな役割を果たしてきた。

破壊力学はこのように本格化してまだ1/2世紀といったところであるが、わが国では、鉄鋼材料を対象とする限りにおいては、成熟した研究分野であるかのようにみなされる傾向が強い。事実、わが国の破壊力学の発展を支えてきた日本機械学会や日本造船学会(現、日本船舶海洋工学会)では、破壊力学に関する研究論文が激減し、研究の興味が別の物に移っているようである。本当に、鉄鋼材料の破壊力学は成熟したと言いきれるのだろうか？

考えてみると、前記のパラメータは2次元き裂問題について提案されたものなので、現実の3次元き裂材に適用すると無理が生じることがある。当初

は3次元解析が困難だったので2次元き裂を対象としたのは当然であるが、き裂周りの塑性域の発達部材寸法や負荷モードによって異なるので、それが「塑性拘束」の差を生み、応力場に影響することは早くから指摘されていた。2次元き裂を前提とした取り扱いは安全側の破壊評価を導くが、高強度鋼(降伏比が高い)ではあまりにも安全側すぎる傾向がある。

また、前記の2次元き裂の解析では、材料の加工硬化特性を表すひずみ硬化指数はある一定値が仮定されている。従来は鋼材の強度レベルに応じてひずみ硬化指数がほぼ定まっていたが、近年の製鋼プロセスの発展により、今ではテーラーメイド的に加工硬化特性を付与できるようになり、しかも、ひずみレベルによっても加工硬化特性が変化する。このことは、大きな塑性変形を伴う場合には、「塑性拘束」の問題とあわせ、CTODや $J$ 積分で一義的に応力場を決定しにくいことを意味する。

さらに、超微細鋼や表面微細鋼、複合組織を意図的に利用した鋼材などが出現すると、破壊のメカニズムも従来のように単純ではない。応力クライテリオン、ひずみクライテリオンが適用できるのか、適用できるとすればその範囲は？ また、難関の破壊様式の脆性から延性への遷移領域では、まだ遷移のクライテリオンは明らかになっていない。

わが国の鋼材製造技術、特に高強度鋼の製造技術は文字通り世界をリードしている。しかしながら、鋼材の特性評価手法や、鋼材を構造化したときの性能評価手順は残念ながら欧米の手法に頼らざるを得ないのが事実である。得意の高強度鋼技術を活かし、鉄鋼利用分野においてもわが国が世界をリードするためには、鉄鋼破壊研究の果たす役割はまだまだ大きいと考えるのだが。

# 「鉄鋼材料の破壊靱性評価手順の標準化」プロジェクト

- 成果報告と今後の国際標準化推進活動 -

鉄鋼材料研究部 櫻谷敏和

## 1 はじめに

本プロジェクトは、経済産業省産業技術環境局標準課から委託された産業技術研究開発委託事業として、平成14～16年度の3年間にわたって実施されたものである。本研究開発事業は、わが国が技術的優位性を有する分野における国際標準の獲得を目標とした活動を支援するものと位置づけられている。以下に研究開発成果を示すとともに、それをもとに国際標準(ISO)化を推進している状況について紹介する。

## 2 研究開発の背景と目的

わが国の鉄鋼業は高強度・高靱性等の特性を要求される高級鋼の製造技術において世界をリードしており、厳しい設計条件のもとに製作される高度な鋼構造体には、日本からの高級鋼材の供給が不可欠とされている場合も多い。鋼構造体の安全性確保にとって不安定破壊(脆性破壊)を防止することが極めて重要である。

鋼材の破壊靱性の評価には破壊力学パラメータとして、応力拡大係数 $K$ 、 $J$ 積分、き裂先端開口変位(CTOD)が開発され、工業的に用いられている。しかし、汎用されているCTOD破壊靱性試験法の三点曲げ負荷のもとで計測される脆性破壊に至る臨界値は、き裂先端近傍の厳しい応力状態を反映して小さくなり、高靱性鋼材の特性を過小評価しがちであると考えられている。特に降伏比 $YR = \text{降伏応力} / \text{引張}$

強さ)が大きくなる高強度鋼に対してはより厳しい評価法と考えられる。実際の鋼構造要素には主として引張応力が作用し、き裂周囲に塑性域が発達し応力場に塑性拘束緩和が生じている。この現象を考慮して実際に要求される鋼材の破壊靱性値を適切に評価することが、高純度・高 cleanliness 鋼の精錬・鋳造技術と高度な圧延技術を駆使して製造される高級鋼の適用を合理的に拡大することに寄与すると考えられる。

以上の観点より、CTOD破壊靱性試験法で評価される鋼材の破壊靱性値を実際の鋼構造物に対応する破壊靱性値に適切に評価し直す手順を提示・検証し、その成果をISO規格として成立させることを目標に研究開発事業を推進した。

## 3 研究開発推進体制

JRCM内に「鉄鋼材料の破壊靱性評価手順の標準化」研究体を設置し、ローカルアプローチ手法に基づく破壊力学分野をリードしている大阪大学大学院工学研究科の南教授を開発責任者として、鉄鋼素材メーカー、重工、建築、機械分野の専門家の参画のもと研究を実施した。また、本分野で自主規格、WES2805、WES2808<sup>1)</sup>を制定した実績をもつ(社)日本溶接協会が参画し、標準化案の策定を推進した(図-1)。

## 4 成果概要

破壊靱性評価試験片のき裂先端部の破壊駆動力と、塑性拘束緩和現象を考慮した鋼構造要素のき裂先端部の破棄

駆動力の評価を適切に行う指標として、材料の微視的破壊モデルにおいてその有効性が確認されているワイブル応力、 $\sigma_w$ を採用する。

図-2に示すように、破壊靱性評価試験片の $\delta_{WP}$ と引張応力下の構造要素の $\delta_{WP}$ を評価し、かつ両者の破壊の際の $\sigma_w$ が等価であると検証することが本研究開発の第1の目標である。その検証のもとに、構造要素に存在する塑性拘束緩和を反映する等価CTOD係数 $\beta = \delta_{eff} / \delta_{WP}$ が定義される。また $\sigma_w$ の評価には、き裂先端近傍の局所応力 $\sigma_{eff}$ と材料の脆性マイクロクラックの確率分布から求められるワイブルパラメータ $m$ が必要であり、これらの値を適切に評価するための研究手法の妥当性を確かめ、 $\beta$ の評価手順に折り込むことが本研究開発の第2の目標である。

- 具体的には以下の研究を実施した。
- 材料定数となるワイブルパラメータ $m$ の決定手順の標準化
  - 厳密な $m$ 値評価を目的とする、統計的に有為な $m$ 値を提供する脆性破壊試験法の評価、並びにFEM法による $\sigma_w$ の計算を介して、統計的に回帰される $m$ 値の妥当性を検証する手順の明確化。
  - 簡便な $m$ 値推定に資する、各種鋼材の機械的特性の文献値をもとにした $m$ 値の材料因子依存性の調査。
  - 大型構造要素試験によるワイブル応力カクライテリオンの有効性の実証
  - 脆性破壊時の限界ワイブル応力が試験片形状・寸法、応力負荷様式等とは

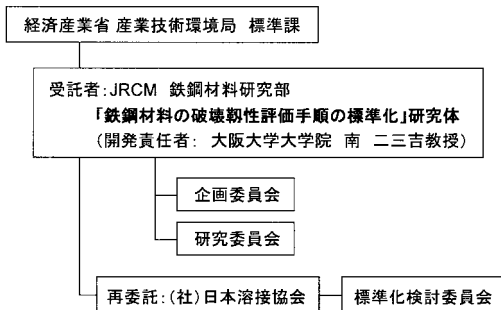


図-1 研究開発推進体制

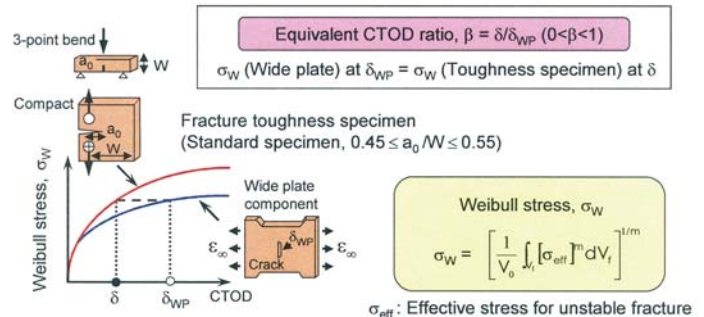


図-2 ワイブルクライテリオンに基づく等価CTOD係数、 $\beta$ の定義

ほぼ無縁の材料特性であること（ワイブル応力クライテリオン）を検証し、結果として等価CTOD係数、を用いた破壊評価の妥当性の確認。

本破壊評価手順の工業化に向けた等価CTOD係数、のノモグラフ化  
構造要素のき裂先端近傍のワイブル応力は、負荷応力レベルのみならず、き裂形状・寸法、及び材料の加工硬化特性に応じて変化する。これらの条件を折り込んだ厳密な応力解析を行って定める手法に対して、の工業的評価のためのノモグラフを作成する。ノモグラフ検討に際して考慮した代表的な変数は以下のとおり。

- ・き裂形状因子：き裂タイプ（表面き裂、板厚貫通き裂）、き裂位置（中央き裂、端部き裂）・き裂寸法
- ・材料特性：ワイブルパラメータ $m$ 、加工硬化特性（降伏比 $YR$ 、一様伸び、強度レベル）
- ・鋼板厚さ

以上の研究結果の詳細は、平成16年度成果報告書<sup>2)</sup>に示されるとともに、わが国の関係産業界（鉄鋼、重工、建築、機械等）に成果を周知せしめる観点より、平成17年度秋期の溶接学会全国大会において連報形式で報告した<sup>3)</sup>。

実用的な観点からして重要な知見は、次の2点である。

- ・小規模降伏条件（25mm厚鋼板の小規模降伏限界CTOD値として0.01mm）を超える負荷応力レベルでは、等価CTOD係数、は0.5を超えることのないほぼ一定の値を示す。
- ・各種鋼材の $m$ 値を評価する実験・文献調査の結果によれば、低靱性鋼材（25mm厚鋼材の限界値として0.05mm以下）の $m$ 値が10と評価されるのに対し、高靱性鋼材のそれが20と評価できること（高級鋼材では40以上の数値も確認）が明らかとなり、 $m$ 値の増大とともにが低下する関係のもとで高級鋼の合理的な活用が可能となることが示唆された。

## 5 ISO規格案の策定

以上に示した研究成果をもとに、小規模降伏条件を超える引張応力負荷下

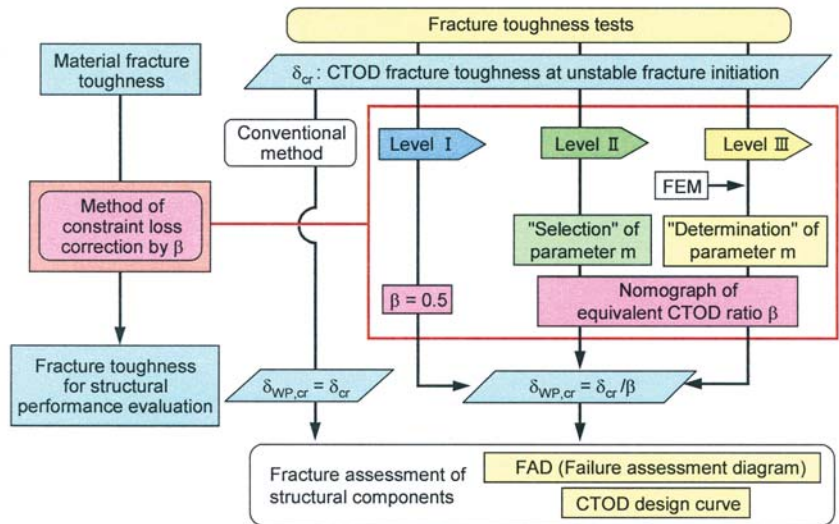


図-3 塑性拘束緩和を考慮した構造要素の破壊靱性評価手順

の構造要素の脆性破壊特性を破壊靱性試験片から得られるCTOD値から推定する手順の規格化案を策定した<sup>2,3)</sup>。

図-3に推定手順のフローを示す。等価CTOD係数、の算定手順が規格の骨子となるが、をより安全サイドで評価する観点から、の算定に必要な情報量のレベルに応じてより合理的な算定手法を適用する構成としている。=1を適用する過度に安全サイドにあると考えられる従来評価法に対して、以下の3レベルの評価手順を定義した。レベルⅠ：簡易評価レベル。を評価するのに必要な情報が十分に得られない場合であり、大きめの値、0.5を設定するケース。

レベルⅡ：標準的な評価レベル。構造要素のき裂タイプ・寸法、鋼材の降伏比 $YR$ が想定できるが、鋼材のワイブルパラメータ $m$ が未知の場合であり、 $m$ を安全サイドの数値、10、あるいは20に設定したうえでノモグラフから値を読みとるケース。

レベルⅢ：鋼材のワイブルパラメータ $m$ をも評価できるケースであり、具体的な条件を考慮したFEM解析からより小さな値を算定するケース。

このように評価した値が、すでに各国で採用されている構造要素の破壊性能評価法、例えばBS7910<sup>4)</sup>で採用されているFAD法(Failure Assessment Diagram: 破壊評価線図)と整合することを確認しつつISO規格化を推進し

ている。

## 6 ISO規格化推進活動の概況

鉄鋼分野の国際競争力維持の観点から、合理的なISO規格の制定、改訂に対する積極的な活動が、(社)日本鉄鋼連盟の標準化センターを中心に複数の機関が分担する形で進められている。鋼材(ISO/TC10)、鉄鉱石(TC102)、非破壊試験(TC135)、腐食(TC156)への取り組みとともに、高級鋼材の特性を正しく評価するための金属の機械試験(TC164)への積極的関与が必要と考えられている<sup>5)</sup>。

本研究開発から提案される規格のISO化推進は、(財)日本規格協会の支援を得つつJRCMが担当することとなり、平成17年度よりJRCM内に「ISO規格化推進委員会」を設置した。平成17年10月に英国で開催されたTC164委員会において本規格案を南教授が説明し、本案は日本からの提案として、TC164/SC4F(Fracture)でハンドリングすることが欧米主要国のISO関係者を含め合意された。本提案の背景は合理的な設計、評価手法のもとで構造体の健全性を判断することにあるが、同様のコンセプトの活動が同時期にEU内でもFITNET(European Fitness-for-service Network<sup>6)</sup>)として推進されている。FITNET推進主体となる独仏英等の諸国、及び米国の有力研究者から、を採用した手法が各国の破壊性能評

価手法と整合するか否かのラウンドロピンの評価を実施したうえでISO化の方向に進むことに対する原則的な賛同を得ている段階にある。

今後数年の作業を要するであろうが、本提案のISO規格化を推進し、高張力鋼等の高級鋼を活用する場の拡大に寄与させたい。また今回の評価は静的負荷下の脆性破壊を対象になされたものであるが、動的負荷、あるいは延性き裂成長を伴う脆性破壊、溶接継手の評価に展開していくことが今後の課題であろう。

#### — (参考文献) —

- 1) (社)日本溶接協会  
WES2805-1997: 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(1997)  
WES2808-2003: 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(2003)
- 2) JRCM: 経済産業省、産業技術研究開発委託事業「鉄鋼材料の破壊靱性評価手順の標準化」平成16年度成果報告書(2005年3月)
- 3) 南、他: 「鋼構造の破壊性能評価の

- ためのCTOD破壊靱性値の拘束緩和補正手法 - 鉄鋼材料の破壊靱性評価手順の標準化プロジェクト (ISTプロジェクト) - 」、他連報多数、日本溶接学会秋期全国大会講演(2005年9月)
- 4) BSI, BS7910-2005: Guide on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures(2005)
  - 5) 日本工業標準調査委員会標準部会: 「国際標準化活動基盤強化アクションプラン」、2004年6月(2005年3月改訂)
  - 6) www.eurofitnet.org

#### セミナー案内

##### 金属学会セミナー 「非シリコン半導体の現状と展望」

主催: (社)日本金属学会

日時: 3月29日(水) 10:00 ~ 16:40

場所: 文部科学省研究交流センター  
つくば市竹園2 - 20 - 5

定員: 70名

参加費(テキスト代含む):

- |      |     |         |
|------|-----|---------|
| 事前申込 | 正員  | 12,000円 |
|      | 非会員 | 15,000円 |
| 当日申込 | 正員  | 15,000円 |
|      | 非会員 | 20,000円 |

事前申込締切日: 3月15日(水)

問い合わせ先: (社)日本金属学会  
セミナー参加係

E-mail: apply@jim.or.jp

TEL: 022 - 223 - 3685

FAX: 022 - 223 - 6312

The Japan Research and Development Center for Metals  
JRCM NEWS / 第232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。  
本誌は地球環境保全を考慮し再生紙を使用しています。  
本書の内容を無断で複写・複製・転載することを禁じます。

発行 2006年2月1日  
発行人 小島 彰  
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](mailto:jrcm@oak.ocn.ne.jp)