

## 67 破壊靱性試験の構造性能評価への Transferability を考慮した破壊靱性要求 (第1報)

【討論】 松村 裕之, 道場 康二 君 (1) 等価 CTOD 概念に基づく新しい破壊靱性要求手法を提案されていますが, 実際にこれを用いた評価を実施する場合についてご質問します。従来法では, 要求変形能  $\epsilon_{\text{R}}^{\text{B}}$  に残留応力の重畳の影響を考慮する場合や構造的な不連続部での応力集中を考慮する場合には, それぞれの評価ひずみを積算することになります。これは, それぞれのひずみと CTOD への対応が一对一にあるとの考え方に基づくと考えますが, ここでご提案の方法では残留応力や応力集中によって生じた評価ひずみを, 例えば Fig. 8(b) において従来と同様に,  $\epsilon_{\text{R}}^{\text{B}}$  に足し込むことで良いのでしょうか。そのようにして得た  $\epsilon_{\text{R}}^{\text{B}}$  と Weibull 応力は対応するのでしょうか。ご教示をお願い致します。

(2) 等価 CTOD 概念で評価される材料の破壊靱性要求値を, ここでは広幅引張試験片と三点曲げ試験片の場合で比較されています。実構造要素での拘束の程度と比べて, 三点曲げ試験片の切欠きは深過ぎて拘束が大き過ぎる一方, 広幅平板を模擬した広幅引張試験片の拘束の程度では, 多様な実構造要素の評価には問題があると考えます。このような現実から, 実構造要素の拘束の程度ごとに評価方法を取り決めるとの考え方もありますが, 構造要素ごとに拘束の程度を把握することは困難な作業と思われます。これに対して, 構造要素の重要性や拘束の程度に応じて, 材料の破壊靱性試験法を選択できるような評価の考え方もあると思います。ここで, コンパクト試験片のような試験片を想定して, Weibull 応力により Fig. 9(b) のような検討を行えば, 広幅引張試験片と三点曲げ試験片の間に入るものと思いますが, 試験片の拘束度を表す Q パラメータや T-stress のようなものと, ここでの検討結果は一意的に対応すると考えて良いのでしょうか。また, 実構造の評価を踏まえた, 材料の破壊靱性試験法のあり方についてご意見を頂戴したいと思ひます。

【回答】 (1) 本論文で用いている  $\epsilon_{\text{R}}^{\text{B}}$  は広幅継手の全体歪であり, ノミナルな負荷歪に相当します。本論文で提案する等価 CTOD 概念による靱性要求法は, 設計での要求変形能として必要全体歪  $\epsilon_{\text{R}}^{\text{B}}$  を考え, その  $\epsilon_{\text{R}}^{\text{B}}$  のもとで広幅継手の破壊駆動力としての Weibull 応力を計算し, それに耐えうる靱性値として必要曲げ CTOD を導出します。従いまして, 構造不連続による応力集中が存在するときには, それによる歪集中を  $\epsilon_{\text{R}}^{\text{B}}$  に足し込むのではなく, 構造不連続をもつ継手に対して負荷レベル  $\epsilon_{\text{R}}^{\text{B}}$  での Weibull 応力を計算します。すなわち, 構造不連続による応力集中効果は, 破壊駆動力の Weibull 応力に足し込まれることになりま

す。同様に, 残留応力が存在する場合にも, その影響は Weibull 応力に足し込みます。前者の構造不連続に対してはモデル解析が可能で現在検討中ですが, 後者の残留応力の Weibull 応力への影響は今後の検討課題といえます。

(2) ご指摘のように, 使用材料の板厚と同寸法の深い切欠きをもつ三点曲げ靱性試験片は塑性拘束がかなり大きいので, 当該の実構造要素と同程度の拘束度となるような浅い切欠きをもつ試験片で破壊靱性試験を行うのも一つの方法で, これについては溶接学会論文「溶接継手の破壊性能評価のための靱性評価手法に関する考察—Shallow Notch CTOD 試験の意義—, 溶接学会論文集, 第 11 巻, 第 3 号, pp. 454-460 (1993)」で著者らも指摘を行っています。しかし, その場合は, 当該構造要素の塑性拘束度を予め知る必要のあることと, shallow notch 試験で得た破壊靱性値は他の材料・溶接部の靱性値と直接比較できないことなどから, 内外の破壊靱性試験規格にあるように, 切欠き長さ/試験片幅 = 0.5 の標準試験片を破壊靱性評価に用い, その情報を構造要素の破壊性能評価に活かす方法として, Weibull 応力を媒介とする等価 CTOD 概念を本論文で提示しました。同じ作用負荷レベルで Weibull 応力が大きいということは, その試験片形状の塑性拘束が大きいことを意味し, Q パラメータや T-stress が大きいことと対応します。ただし, Q パラメータや T-stress の値は負荷レベルに依存するので, 形状の異なる試験片どうしの破壊評価には適用上の問題があり, 最近では Q パラメータや T-stress に基づく破壊評価法は用いられなくなる方向にあるようです。

また, コンパクト試験片の Weibull 応力は広幅引張試験片と三点曲げ試験片の間に入るのではとのコメントですが, コンパクト試験片は三点曲げ試験片よりも拘束が強いとの報告があり (2次元解析結果), 同じ CTOD レベルではコンパクト試験片の Weibull 応力は三点曲げ試験片より大きくなることが予想されます。

【討論】 半田 恒久, 久保 高宏 君 Fig. 20 において, HAZ 靱性が低くなる程, 許容強度ミスマッチ度  $(S_r)_v$  と要求変形能  $\epsilon_{\text{R}}^{\text{B}}$  の関係を示す曲線の勾配がきつくなっておりませんが, これは Fig. 19 における Weibull 応力  $\sigma_{\text{W}}^{\text{HAZ}}$  と Overall strain の関係を示す曲線の勾配が, 高 Overall strain 域で緩やかになることに起因しているものと御推察致します。ところで, Fig. 19 において  $\sigma_{\text{W}}^{\text{HAZ}} = 1450 \text{ MPa}$  付近 ( $\delta_{\text{HAZ}}^{\text{AZ}} \approx 0.015 \text{ mm}$  相当) では  $(S_r)_v = 0.8 \sim 1.1$  の曲線がほぼ 1 点で接触しております。Fig. 20 中に,  $\delta_{\text{HAZ}}^{\text{AZ}} \approx 0.015 \text{ mm}$  に相当する  $(S_r)_v$  と  $\epsilon_{\text{R}}^{\text{B}}$  の関係をオーバープロットした場

合、曲線の勾配が  $\delta_{\text{HAZ}}^{\text{AZ}} \approx 0.010 \text{ mm}$  の場合よりもきつくなり、 $\delta_{\text{HAZ}}^{\text{AZ}} \approx 0.015 \text{ mm}$  に限っては、変形能が強度ミスマッチ度に依存しなくなる様に思われます。この様に、ある HAZ 靱性レベルで、変形能が強度ミスマッチ度に依存しなくなるケースは、実際に起こり得るのでしょうか。また、有り得る場合、強度ミスマッチ度の影響を受けにくくなる HAZ 靱性レベルが評価で問題となるようなレベル (0.1 mm 程度) まで大きな値となる可能性はあるのでしょうか。

【回答】 Fig. 19 において Weibull 応力 = 1450 MPa あたりで広幅継手の Weibull 応力-全体歪関係が接近していますが、これは全体歪では約 0.25% のレベルとなっています。この全体歪レベルは広幅継手の full yield レベルに相当し、全体歪-CTOD 関係でみると、CTOD が全体歪に対して急に上昇する領域となります。一方、切欠き先端近傍の応力はその変形レベルにおいても CTOD の増加によって漸次増加するので、Fig. 19 で示したように、full yield レベルで広幅継手の Weibull 応力-全体歪関係が接近するという現象が生じます。よって、この full yield 時に限って広幅継手の変形能は強度ミスマッチに見かけ上あまり依存しなくなります。しかし、full yield 後の general yield 領域では広幅継手の CTOD は全体歪に対してほぼ単調に増加していくので、継手変形能は強度ミスマッチの影響を再び受けるようになります。従いまして、ご指摘のような懸念は一般的には不要といえます。なお、Fig. 20 では HAZ 靱性レベルをかなり低い値で表示していますが、これは考

えやすくするために三点曲げ試験片の全体が HAZ から成る場合を想定 (再現熱サイクル材のように HAZ 領域が大きなものを想定) しているためで、実際の溶接継手では HAZ 幅が狭いので、対象となる CTOD レベルはこれより大きくなる (その程度は m-パラメータの値にも依存する) ことを申し添えます。

【討論】 島 貴 広 志 君 Fig. 15 の様にボンド部にノッチを入れた場合、ワイブル応力は溶金と HAZ 両方の平均的な値になると思いますが、発生位置はどちらかにずれることが多いように思います。この様な場合、ワイブル応力による評価と CTOD による評価とで結果が対応しないことになるように思います。この場合はワイブル応力による評価はどのようになられるのでしょうか。

【回答】 ボンドノッチの場合、HAZ 靱性が低ければ HAZ から支配的に、WM 靱性が低ければ WM から支配的に脆性破壊が発生することになり、実際の継手でもボンドノッチの場合、そのいずれかであることが多いように思います。そのときには、HAZ 靱性支配型ならワイブル応力は HAZ 内の応力を HAZ 内で積分し、また、WM 靱性支配型ならワイブル応力は WM 内の応力を WM 内で積分して求めます。もし、HAZ 靱性支配型か WM 靱性支配型かの判断ができない場合には、それぞれの領域で別個にワイブル応力を求めて、HAZ ワイブル応力が HAZ 限界ワイブル応力に達するのと、WM ワイブル応力が WM 限界ワイブル応力に達するのとで、いずれが早いかで判断することになります。

## 68 座屈により大きな圧縮歪を受けた鋼構造部材の亀裂強度に関する研究 (その2)

【討論】 間 野 正 己 君 座屈崩壊後、引続き大きな圧縮および引張りの繰返し荷重を受ける構造部材に関して研究をして居られますが、設計時には座屈強度は船の一生で最も大きい荷重を基に決められます。又圧縮および引張りの繰返し荷重については、頻度と大きさを疲労設計をしています。

本研究では、どのような状況を想定しているのでしょうか。

【回答】 御指摘の通り、船舶などの大型鋼構造物では、座屈強度や疲労強度などを充分考慮して設計されていると考えられますが、腐食衰耗による板厚の減少、疲労亀裂の発生・進展による有効断面の減少、荒天回避の失敗による過大荷重負荷などにより、局部構造部材が座屈崩壊する場合が考えられます。

部材が座屈崩壊しますと、数回~数十回の繰返し荷重によりこの部材は破断してしまいます。その後、他の部材の荷重増加による連鎖的な座屈崩壊および亀裂の進展・不

安定亀裂により、最終的に大破壊事故へと発展するものと考えられます。

本研究は、上述のような大破壊事故の起点と考えられる、局部構造部材の座屈後の亀裂発生現象に関して定量的に評価しようと試みたものであります。

【討論】 伏 見 彬 君

Fig. 7 の結果は、大局的に、座屈崩壊後の亀裂の発生に関して、1 回限りの大きな歪を与えた場合、大きさが約 1/2 の歪を 10 回程度繰返し与えた場合、大きさが約 1/4 の歪を 100 回程度繰返し与えた場合、それぞれ亀裂発生条件としてほぼ同等であることを示しているのでしょうか。

このことに一般性があると、折損事故の原因究明における荷重の考え方・捉え方に大きな影響を与える可能性を持つと思います。

【回答】 Fig. 7 では、亀裂発生部の初回曲げ圧縮時における軸方向歪量と、微小亀裂発生繰返し数との関係が、両対数目盛でほぼ線形になることを示しております。