

鋼構造物の破壊靱性試験標準の適正化

東京大学大学院 工学系研究科 システム創成学専攻 学籍番号 37-207326 小沢 匠
 指導教員 川畑友弥 教授

Keywords: fracture toughness test; local compression; pre-strain; MOTE; temperature control;

1. 緒言

脆性破壊は塑性変形をほぼ生じずに発生する不安定破壊現象であり、突発的に甚大な被害を引き起こす。破壊力学においてこの不安定破壊の発生の有無は破壊靱性値と呼ばれる指標に基づき破壊の有無が決定される。すなわち、実構造物に生じる破壊の駆動力が材料試験によって求めた破壊に対する抵抗力としての破壊靱性値を上回った際に破壊が発生すると評価する。この材料抵抗力である破壊靱性値を決定する規格として、ISO 12135, ISO 15653, WES 1108 及び WES 1109 [14]といった規格があり、長手方向中央に機械切欠き及び疲労予亀裂によって幅の半分まで設けた初期亀裂を有する角柱型の試験片等を用いる。この試験片を3点曲げによって亀裂を開口させ、不安定破壊が発生した際の荷重の大きさや切欠き口の開口量などから破壊靱性値を評価する。

これらの規格によって不安定破壊の発生が長年防止されてきていたものの、近年では極厚板の需要増加に伴い、今まであまり考慮されていなかった問題が表面化している。加えて、近年では安全性のみならず、経済性や環境面への配慮が重要視されており、より合理的な評価が求められている。規格は定期的に見直されるものの、未だ改善の余地がある要件が多数見受けられると考える。そこで本博士課程において川畑教授の指導の下、①局部圧縮法の推奨条件、②予ひずみと靱性劣化の関係、③MOTE 算出法の見直し、及び④温度管理時間の見直し、という4つのテーマについて解析的、実験的に調査を行った。

2. 局部圧縮法の推奨条件見直し

ISO 12135 [1]では疲労予亀裂について、その直進性を要求しているが、溶接継手試験片では溶接残留力の影響により湾曲した疲労予亀裂形状となる。これを解決するために、ISO 15653 [2]では局部圧縮法（Local Compression: LC）を提示している。これは治具を用いてノッチ端を含む試験片のリガメント側を板厚方向に加圧し、予ひずみを与えた後に疲労予亀裂を導入する手法であり、一般的には1%の予ひずみを与えることが多い。ただし、現行の推奨条件にて実施したLCは破壊靱性値を低下させることが知られており[5]、合理的な評価を妨げている。そこで、破壊靱性値を維持しつつ、疲労予亀裂を直進させる新たなLC推奨条件の調査を実施した。

2.1 典型的なLCによる破壊靱性の劣化

新たなLC推奨条件の調査に先立ち、まず典型的なLCが疲労予亀裂の直進性及び破壊靱性値に与える影響を調査した。典型的なLC条件を図1に示す。板の面中央に板厚からその半分程度の寸法を有する矩形治具で加圧する条件であり、予ひずみは規格の推奨条件を考慮し、1%まで付与した。

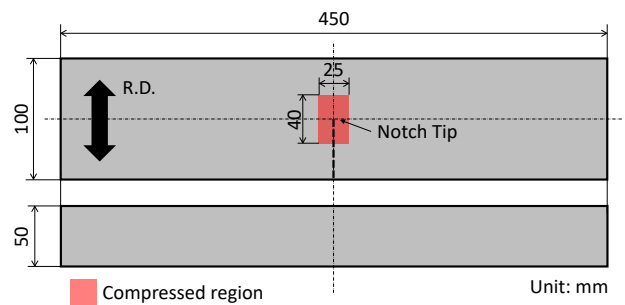


図1 典型的なLC条件

有限要素法を用い、この LC 条件の残留応力の変化や相当塑性歪み増分を確認した。また実試験を行い疲労予亀裂形状と破壊靱性評価値を評価した。結果を図 2 に示す。50%以上の破壊靱性値を維持するには予ひずみ量を 0.4%未満に抑えなければならない一方、疲労予亀裂を直進させるには 0.6%以上の予ひずみ量が必要であり、既存の LC では予ひずみ量の調整のみで破壊靱性値の維持と疲労予亀裂の直進性を両立できないことが明らかとなった。

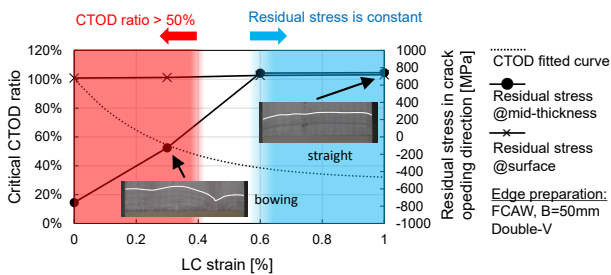


図 2 典型的な LC の影響

2.2 工学的判断より特定した LC 推奨条件

工学的判断によって選定した LC 推奨条件に対して数値解析と破壊靱性試験を実施した。結果を図 3 に示す。左端の LC 条件は比較のために用意した典型的な LC であり、疲労予亀裂は直進するものの、破壊靱性値は低めの評価を与えた。左から 2 番目、及び 3 番目の LC 条件は今次新たに提案したノッチ端を直接加圧しない LC であり、直進した疲労予亀裂を得られつつ相対的に高めの破壊靱性値を与えた。残りの右端及び右から 2 番目の LC はリング型の治具を用いたものであり、残留応力の緩和が不十分であり湾曲した疲労予亀裂形状となった。

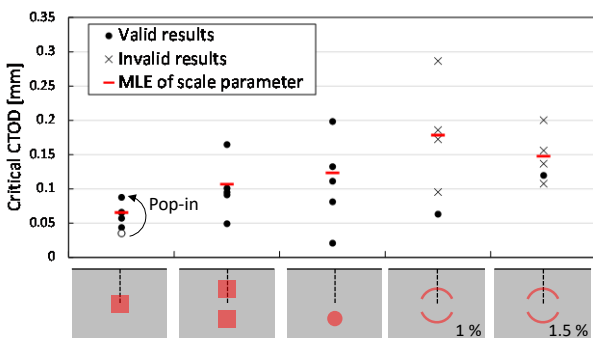


図 3 工学的判断より特定した LC の破壊靱性値

2.3 ベイズ最適化より特定した推奨 LC 条件

前節では工学的判断により良好 LC 条件の候補を選定したものの、直感的には想像もつかない条件に真に良好な条件が存在する可能性も否めない。加えて、良好となる LC の特徴を特定することも現象の理解の上で重要であると考えられる。そこで、ベイズ最適化を用いてある程度網羅的に LC 条件を探索し、良好条件の範囲を特定し、その範囲内の条件にて破壊靱性試験を実施した。LC 条件は図 4 に示す 7 つのパラメータによって特定した。このパラメータを変えることによって多種多様な LC 条件を描画可能である。

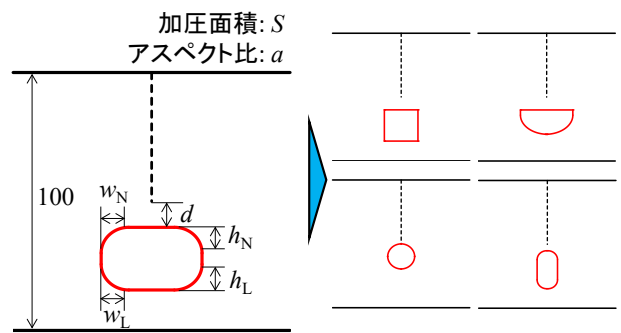


図 4 LC 条件のパラメータ

ベイズ最適化の目的関数は式(1)を用いた

$$O.F. = \left(\frac{\text{MIN}[\sigma_{\min} - \sigma_Y, 0]}{\sigma_Y} \right)^2 + \bar{\delta}_E \quad (1)$$

ここで、 σ_{\min} はノッチ端残留応力の最小値、 σ_Y は材料の降伏応力、 $\bar{\delta}_E$ は 0.05 から 0.15mm の範囲で正規化した限界 CTOD の誤差率であり、LC によって残留応力が緩和され、かつ CTOD の誤差率が低いほど目的関数は小さな値を示す。このベイズ最適化によって得られた目的関数とパラメータの傾向を調査したところ、加圧面積が 500 から 700mm²かつノッチ端から加圧部までの距離が 5 から 10mm の範囲にて良好条件となることが判明した。

この良好範囲内の LC 条件にて破壊靱性試験を行った。結果を図 5 に示す。左から 1 番目から 3 番目の LC は前節にて実施した条件、右から 2 番目は ISO にて推奨されている LC 条件[2]、右端が今次ベイズ

最適化によって特定した推奨 LC 条件範囲内のものである。結果を比較すると ISO 推奨条件は他の LC と比較して極めて低い靱性値を示す一方、ベイズ最適化により特定した条件は前節より特定した推奨条件とほぼ同等の破壊靱性値を示した。以上より、ベイズ最適化によって既存の推奨条件より優れた LC 条件を特定したと考える。

本研究により特定した推奨条件について ISO 15653 に反映するよう提案し、これが承認された。次回改正の際に本研究結果が反映される予定である。

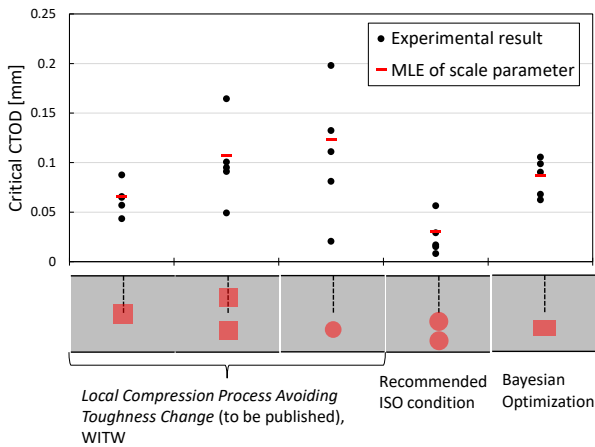


図 5 各 LC 条件における破壊靱性値

3. 予ひずみと靱性劣化の関係

典型的な予ひずみによって靱性が劣化することは先行研究[5, 6]によって示されているものの、これらは低ひずみにおいて疲労予亀裂が湾曲しており、純粋に予ひずみ量と破壊靱性値の関係を示せていないと考える。そこで、疲労予亀裂の直進性に影響を与えないように予ひずみを付与し、この予ひずみ量と破壊靱性値の関係を検証した。加えて、予ひずみ方向の違いによって生じる破壊靱性値の劣化に及ぼす影響の差異を解析的に検討した。

解析的検討では体心立方格子のすべり系に着目し、予ひずみ時と同一系のすべりが破壊試験時に発生した際に靱性劣化が生じると仮定した。シュミット因子に基づいた評価によって同一系のすべりが発生する確率及びそのすべり量の期待値を求める式を導出し、モンテカルロ法によってその分布を取得した。

その結果、予ひずみ方向と破壊時の荷重方向が一致する場合その予ひずみ量を 1.23 倍することによって垂直方向の予ひずみ量に換算できると考えた。

破壊靱性試験の条件とその結果を図 6 に示す。(a) は典型的な LC をそのまま用いたものであり、疲労予亀裂は予ひずみ量によってある程度変化した。(b) は引張試験片を切り出し、引張予ひずみを付与した後に小型の試験片を切り出すものであり、この条件のみ予ひずみ方向と破壊時の荷重方向が一致する。(c) は LC 後にその周辺から小型の試験片を切り出すものであり、(d) は機械切欠きのみを設けて疲労予亀裂を導入しない条件である。破壊靱性値に着目すると、1%の予ひずみによって 50%未満まで低下していた。また、提案した換算方法により他の試験結果と傾向が一致したため、提案手法は有効であると考えた。

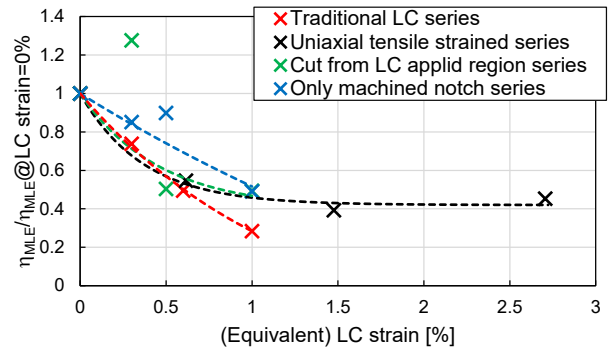
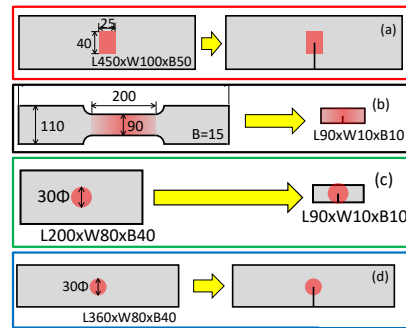


図 6 試験条件と破壊靱性値

4. MOTE 算出法の見直し

破壊試験は一般に複数回実施し、その試験結果から代表値を求める。この代表値は 3 個の最低値と等価な統計量 (Minimum of Three Equivalent: MOTE) に基づき評価され、現行要件では試験本数に応じて特定の試験結果を参照し、MOTE を評価する。しかし、

現行要件は MOTE 評価値に与える試験本数の影響が強く、加えて特定の結果のみを参照するためバラツキも大きい。そこで、式(2)及び(3)に示す新たに 2 種類の MOTE 算出法を開発した。

$$X'_{\text{MOTE}} = \frac{3}{N(N-1)(N-2)} \sum_{i=1}^{N-2} (N-i)(N-i-1) X_{@i\text{-thLowest}} \quad (2)$$

$$X'_{\text{MOTE}} = \begin{cases} \frac{1}{3} \text{AVG}[X] & \text{if } \Delta a \geq 0.2\text{mm in all} \\ \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{3}} \text{RMS}[X] & \text{if } \Delta a < 0.2\text{mm in all} \\ \left(\frac{1}{3} \exp\left[-3 \frac{X'_T}{\eta_{\text{MLE}}}\right] + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi X'_T}{3\eta_{\text{MLE}}}} \text{erf}\left[\sqrt{3} \frac{X'_T}{\eta_{\text{MLE}}}\right] \right) \eta_{\text{MLE}} & \text{others} \end{cases} \quad (3)$$

$$\eta_{\text{MLE}} = \frac{\text{SUMSQ}[X_C] + X'_T \text{SUM}[X_U]}{NX'_T}$$

ここで、 X'_{MOTE} は MOTE 評価値、 N は試験本数、 X は試験結果、 Δa は安定亀裂長さ、 X_C 、 X_U は Δa が 0.2mm 未満及び以上の試験結果、 X'_T は X_C の最大値と X_U の最小値の算術平均である。式(2)は試験結果から無作為に 3 本抽出した差異の最小値の期待値より導出した。式(3)は破壊靱性値の分布パラメータ[7]を試験結果から推定し、その推定した分布形状から 3 本中の最低値の期待値を求めることにより導出した。解析的に従来手法と解析手法の評価値を比較したところ、図 7 に示すとおり従来手法は試験本数によって評価値が変化し、またバラツキが大きいものの、従来手法は試験本数による評価値の依存が小さく、特に式(3)より求めた MOTE 評価値はバラツキも極めて小さかった。加えて、先行研究[7]の破壊靱性試験結果を用いて従来手法と提案手法の MOTE を比較したところ、解析結果と同様の傾向が見られた。このため、従来手法と比較し、提案手法はより合理的な評価を与えていると考える。

次回 WES 2805 の改正の際、この新 MOTE 新算出法に変更するよう、提言する予定である。

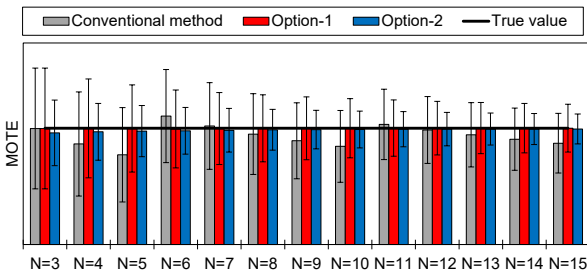


図 7 MOTE 評価値の比較

5. 温度管理時間の見直し

破壊靱性試験規格では試験片の表面から内部に至るまで試験温度に到達したことを保証するため、試験片の表面が試験温度に到達後、 $\pm 2^\circ\text{C}$ の精度で板厚 1mmあたり 30秒間の温度管理を要求している[1, 3]。近年需要が高まる極厚板ではこの温度管理によって試験効率が著しく低下する一方、熱伝導率の高い金属材料において、この長時間の温度管理は過剰な要件ではないかと考える。そこで、式(4)に示す伝熱解析を用いて求めた新たな温度管理時間を提案する。

$$t_{\text{req}} = \frac{B^2 c_V \ln \frac{4|T_R - T_T|}{\pi T_A}}{\pi^2 \lambda} \quad (4)$$

ここで、 B は試験片の板厚、 c_V は定積比熱、 λ は熱伝導率、 T_R は室温、 T_T は目標温度及び T_A は許容温度誤差すなわち 2°C である。

冷却試験を実施し、提案手法の有効性を検証した。角柱型試験片の長手方向中央に幅の半分まで円孔を設け、この穴底及び表面に熱電対を接着した後、樹脂により穴を塞いだ。試験片を冷却し、この冷却過程における試験片内部と表面の温度履歴を記録した。温度履歴の一例を図 8 に示す。冷却開始から 530 秒後に表面温度が試験温度 $+2^\circ\text{C}$ に到達した。提案手法の要求時間は 70 秒であるが、実際に要した時間は 20 秒であった。一方、現行要件では 25 分間の温度管理を要求しており、実に 24 分 40 秒も過大評価をしていた。他の条件においても同様の傾向が見られ、現行要件は比較的合理的な要求時間であると考えられる。

次回 ISO 12135 の改正の際、この新温度管理時間に変更するよう、提言する予定である。

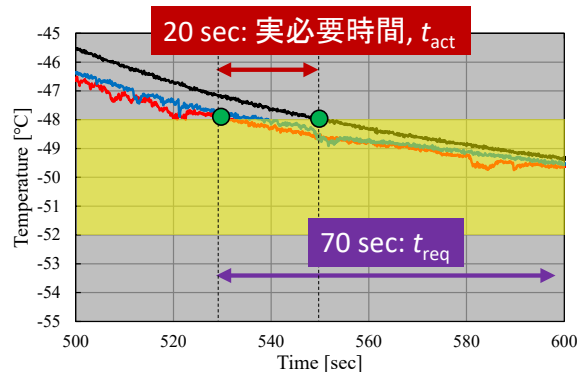


図 8 温度履歴の一例 ($B=50\text{mm}$, $T_T=-50^\circ\text{C}$)

6. 結言

破壊靱性試験規格において改善の余地があると思われる要件を見直し、より合理的な手法を提案及びその有効性の検証を行った。

- LC の推奨条件について破壊靱性を維持しつつ疲労予亀裂を直進させる新たな LC 推奨条件の特定を試みた。
 - 典型的な LC は予ひずみ量の調整のみで疲労予亀裂形状と破壊靱性値を両立することは困難であることが明らかとなった。
 - 工学的判断に基づき選定した LC 条件において、ノッチ端を加圧しない新たな LC 条件は破壊靱性値を維持しつつかつ直進した疲労予亀裂形状を得られた。
 - ベイズ最適化によって良好 LC 条件を探索したところ、良好 LC 条件には加圧面積と加圧位置が特に重要であることが明らかとなった。良好条件内の LC 条件にて破壊靱性試験を行ったところ、良好な破壊靱性値と疲労予亀裂形状が得られた。これにより特定した LC 条件を新たな推奨条件とすべく ISO へ改正提案し、了承された。
- 疲労予亀裂形状が大きく変化しないように予ひずみを与え、予ひずみ量が破壊靱性値に与える影響を調査した。結果、1%の予ひずみを付与することによって破壊靱性値が 50%未満に低下する事が明らかとなった。また、予ひずみ方向の違いによる影響を解析的手法に調査したところ、破壊時と同一方向の予ひずみはその予ひずみ量を 1.23 倍することによって垂直方向予ひずみ量に換算できると考えた。この換算方法を実験結果に適用したところ、両者の破壊靱性分布はおおよそ一致した。
- MOTE の算出について確率論及び統計に基づく新たな 2 種類の手法を提案し、その有効性をモンテカルロ法によって検証した。結果、従来手法は MOTE 評価値が試験本数に強く依存する一方、提案手法は試験本数に寄らず理論値付近の

値を評価し、またそのバラツキも小さかった。加えて、先行研究の実験結果に適用したところ、モンテカルロ法の結果と同様の結果を得られた。この新たな MOTE 算出法を WES 2805 に反映させるよう、提言する予定である。

- 伝熱解析を用いて合理的な温度管理時間の決定方法を提案し、冷却試験によって有効性を検証した。提案手法も温度管理時間を過大評価していたものの、現行要件と比較すれば極めて短く、合理的な評価を与えていると考える。この新たな温度管理時間の決定方法を次回 ISO 12135 の改正の際に反映させるよう提言する予定である。

参考文献

- [1] ISO 12135: 2016, “Metallic materials – Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness,” ISO copyright office.
- [2] ISO 15653: 2018, “Metallic materials – Method of test for the determination of quasistatic fracture toughness of welds,” ISO copyright office.
- [3] WES 1108: 2016, “Standard test method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) fracture toughness measurement”, The Japan Welding Engineering Society.
- [4] WES 1109: 2021, “Standard CTOD test method in welded joints”, The Japan Welding Engineering Society.
- [5] Noriyuki Hara et al., “The influence of local compression on fracture toughness of HT950 weld metal,” technical papers of Welding Structure Symposium, 1999.
- [6] Takumi Ozawa et al., “Typical local compression effect on crack front straightness and fracture toughness”, *Welding in the World*, <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01119-x>, 2021.
- [7] T. Tagawa, S. Suzuki, Y. Haramishi, H. Mimura and T. Miyata: *Journal of the JWS*, 23(2005), 329, <https://doi.org/10.2207/qjwjs.23.329> (in Japanese).