

多様な方向からの予ひずみが付与された鋼材の破壊靱性変化の考察

Consideration of changes in fracture toughness of steels subjected to prestrains in various directions

学籍番号 03-190843 荒浪 和斗  
指導教員 川畑 友弥

(2022 年 2 月 3 日提出)

Keywords: 予ひずみ, 脆性破壊, 破壊靱性, 限界応力, 塑性ひずみ

1. 序論

近年, エネルギー資源としての需要が高まってきている天然ガスを保存する LNG タンクなど, 構造物の素材として様々な鉄鋼材料が使用されるようになってきている. そのような現状の中で, 構造物の脆性破壊による崩壊が大きな問題となっている. 構造物は地震などの外力による多様な予ひずみに晒されており, 常に材料損傷が蓄積される状態にある. したがって, 予ひずみによる靱性劣化挙動を把握することは極めて重要であり, 過去には様々な研究がなされてきた. しかし, 予ひずみによる限界破壊条件などを定量的に把握し, 推測するようなモデルは長い間確立されてこなかった. そのような状況を踏まえ, 昨年度小菅ら[1]は微細粒の TMCP 鋼について, 多方向からの予ひずみが付与された際破壊靱性のマクロ的な指標である限界 CTOD が低下することを示したうえで, 限界破壊条件の一つである限界応力を母材や予ひずみの情報から推定する式(1,2,3)を提案した. これにより, 予ひずみが付与された際の破壊靱性劣化に関する定量的な評価手法が大きく前進した. しかしながら, 提案された推定式のパラメータは材料に依存するものが多く適用可能範囲が極めて限られることが課題であった. そこで本研究では, 昨年度と同様 TMCP 鋼に関して熱処理により約 10 倍の粒径にした素材でも推定式が適用可能かを調査するとともに, 粒径の違いによる限界 CTOD の劣化挙動の違いについても考察することを目的とする.

$$\sigma_{cr} = \sigma_{cr\_As} + \varphi(\eta) \left[ Q_{\infty} \left( 1 - e^{-\beta \varepsilon_{pre}^{pl}} \right) + \omega(\theta) \bar{\alpha} \right] - \sigma_{cut-off\_As} \left( f(\varepsilon_{pre}^{pl}, \theta) + g(\varepsilon_{pre}^{pl}) \right) \quad (1)$$

$$f(\varepsilon_{pre}^{pl}, \theta) = \lambda \omega(\theta) \{ 1 - \exp(-\zeta \varepsilon_{pre}^{pl}) \} \quad (2)$$

$$g(\varepsilon_{pre}^{pl}) = \kappa \{ 1 - \exp(-\xi \varepsilon_{pre}^{pl}) \} \quad (3)$$

2. 実験

2.1 熱処理

TMCP 鋼材をソルトバスで約 1200°C で熱処理を行うことで昨年度の約 10 倍の粒径(約 25 μm)に粗大化した.

2.2 予ひずみ試験

熱処理材に対し Fig. 2.1 に示す形状の引張試験片を圧延方向//長手方向になるように採取し, 塑性ひずみが 2.7% となるように予ひずみ試験を行った. Fig. 2.1 に示すように 7 つの標点を打刻し, ⑦の部分の伸びによりひずみを算出した. 各標点間の初期距離(①~⑥)は約 40 mm であり, 全体で 240 mm となっている. すなわち, 除荷後の評点間距離の変化量を ΔL とした時,  $\frac{\Delta L}{240} = 0.027$  となるような予ひずみを付与した. 各標点間のひずみも計測し大きなばらつきはないことを確認した.

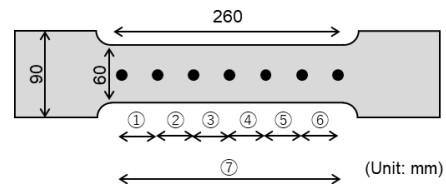


Fig. 2.1 Gage length interval for strain measurement

2.3 引張試験

材料構成式の取得を目的として, Fig. 2.2 に示すように予ひずみが付与されていない素材から  $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  となるように丸棒試験片を採取し, 常温(16°C)と低温(-110°C)において引張試験を行った. 各方向の引張試験から得られた真応力-真ひずみの関係を比較した結果, おおよそ同じ挙動を示し, さらに高温で熱処理した材料であることを考慮すると等方材料であるといえることが確認された.

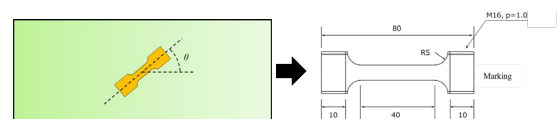


Fig. 2.2 Conditions of tensile test specimen

2.4 破壊試験

Fig. 2.3 に示すように予ひずみ材と As 材がそれぞれ $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ となるように破壊試験片を5本ずつ取得し3点曲げ試験を行うことで限界CTODを算出した. 限界CTODは一般に $m=2$ のワイブル分布に従うことから尺度母数 $\delta_u$ を代表値とした.

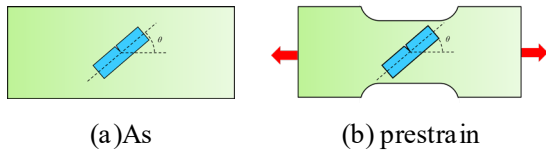


Fig. 2.3 Conditions of tensile test specimen

## 2.5 SEM 観察

破壊試験片破面のSEM観察により破壊起点のノッチ底からの距離を算出し, 後述するFEM解析の妥当性の検証に利用した.

## 3. 予ひずみによる限界CTODの劣化挙動

### 3.1 結果

Fig. 3.1 は昨年度[1]と本年度の破壊試験で得られたAs材の限界CTODに対する予ひずみ材の限界CTODの割合を示している. 同じ角度で比較するといずれも本年度の粗大粒鋼材の方が劣化が大きいことが分かった. また, 昨年度は $45^\circ$ の予ひずみ材を付与した試験片の靱性劣化が最も小さかったが本年度に関しては $45^\circ$ が最も大きいという結果となった. しかし, これらの試験片本数が少ないことを考えるとFig. 3.1に示す曲線のように $0^\circ$ から $90^\circ$ にかけて劣化度が増加するという大まかなトレンドを想定することに間違いはないと考えられる.

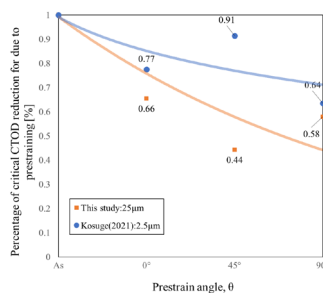


Fig. 3.1 Comparison of the degree of critical CTOD deterioration between last year and this year

## 3.2 角度による劣化度の違いに関する考察

予ひずみと破壊試験によるすべり面の選択の一致性のみを考慮すれば, 予ひずみが $0^\circ$ の劣化が最も大きいことが推定されるが, 実際は角度の増加に伴い劣化が大きくなる傾向が確認された. これは本研究の予ひずみ様式では $90^\circ$ 方向について, 破壊試験のき裂開口方向に対して圧縮の塑性変形が加わっており, き裂開口方向に対して引張方向の塑性変形を伴う破壊試験においてバウシinger効果の影響を最も大きく受けるからであろうと推定できる.

## 3.3 粒径による劣化度の違いに関する考察

昨年度の小菅ら[1]の結果と比較することで, 本年度の粗大粒の方が劣化が大きいことを確認した. 転位が結晶粒界に集積し局部的に応力が集中することで破壊の起点となるマイクロクラックが生成されるという脆性破壊の発生メカニズムを鑑みると, 結晶粒径が大きくなるほどすべり線の長さが大きくなり, 集積する転位の数も多くなることで破壊靱性が低下する. これと同様の原理が働いて予ひずみの影響もより大きく受けるのであろうと推定できる.

## 4. 限界応力の実験値と推定値の比較

### 4.1 FEM 解析

破壊試験に関してFEM解析を行い, 限界応力の取得を行った. 破壊時点で最大主応力が最大値を示す点を破壊起点と仮定し, SEM観察で算出した実際の破壊起点との比較によりその妥当性が示されたため, 最大主応力の最大値の平均を限界応力と定義することとした.

### 4.2 推定値と実験値の比較結果と考察

Fig. 4.1 はFEM解析により取得した限界応力 $\sigma_{cr}$ と推定値 $\sigma_{cr,est}$ を比較したものであるが,  $\theta=45^\circ, 90^\circ$ に関してはよく一致していることがわかる.  $\theta=0^\circ$ は推定値が一割ほど大きな値を示すこととなったが, これはコットレル時効[2]の影響による実験とFEM解析の誤差が大きく反映された結果であると推定できる. 仮にコットレル時効が起きない場合FEM解析で得られる限界応力はより大きな値を示すことが推定され, 推定値との一致性はより高まるであろう. 以上の結果を鑑みると小菅ら[1]により提案された推定式は粗大粒のTMCP鋼材にも適用可能であると結論付けられ, 推定式の汎用性が大きく前進する結果となった.

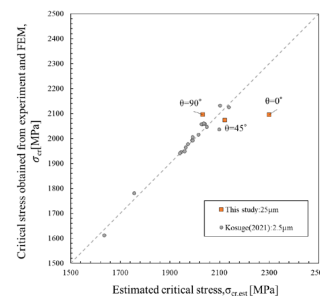


Fig. 4.1 Comparison of experiment and the prediction equation for critical stress

## 参考文献

- [1] 小菅寛輝, 修士論文複雑な塑性ひずみ履歴を経た鋼材の耐脆性破壊特性高精度予測のための研究, 東京大学大学院修士論文, 2021
- [2] A. H. Cottrell and B. A. Bilby, Proceedings of the Physical Society, Section A, Volume 62, Number 1, 49.