

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

Establishment of high accuracy prediction method for brittle fracture after complicated prestrain in steel

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 37-196385 小菅 寛輝
指導教員 川畑友弥 教授

Keywords: Prestrain, Brittle fracture, Strain Gradient Plasticity, Material Damage, Critical Stress

I. 研究背景・目的

近年、液化天然ガス(LNG)の需要拡大に伴い LNG タンク等の地上構造物の数が増加している。これらの構造物は地震等の自然災害が発生した際に脆性破壊する危険性が非常に高く、正確な安全性評価が求められる。自然災害下における高精度な安全性評価を行うためには、鉄鋼材料における脆性破壊の発生メカニズムおよび負荷履歴の及ぼす影響を正確に把握する必要がある。

脆性破壊は、塑性変形が付与されることで結晶粒界における脆化相にパイルアップされた転位を駆動力として発生すると考えられている[1]。すなわち地震等によって塑性変形が付与されることは脆性破壊の発生リスクを増大させることを意味している。一方、複雑な負荷履歴が付与された材料における靱性劣化挙動を定量的に推定する技術は乏しく、そのメカニズムは十分に解明されていない。従来の材料損傷則としては、負荷履歴における相当塑性ひずみを損傷量として考える Coffin-Manson の式[2][3]等が用いられている。しかし Coffin-Manson の式では予ひずみの方向や順番といった影響については無視されており過度に安全側の評価を行ってしまうという問題がある。高精度な安全性評価を行うためには、複雑な負荷履歴に対応できるような新しい材料損傷則の開発が望まれる。更に、材料が破壊するタイミングを規定する限界破壊条件の1つである限界応力に対して、予ひずみがおよぼす影響に関する研究は過去にも行われているが、限界応力が上昇する[4]、一定である[5]、減少する[6]といったように相反する様々な知見が報告されており、統一的な整理が行われていない。

以上のような背景から、本研究では複雑な負荷履歴を受けた材料における材料損傷量の定量的評価並びに限界破壊条件を予測するモデルの構築を目的として調査を行う。まずは、脆性破壊のマイクロメカニズムに立脚して材料損傷量を推定することが出来る簡易結晶塑性モデルの構築を行う(II)。次に、多軸度を有する繰り返し予ひずみや異方向予ひずみといった予ひずみ条件が

変化した際の靱性劣化挙動に関する調査を行い(III, IV)、マイクロ組織が予ひずみ脆化に及ぼす影響の調査を行う(V, VI)。最後に得られた様々な知見について統一的な整理を行いエンジニアリング分野への活用を行う(VII, VIII)。

II. 簡易結晶塑性モデルによる材料損傷量予測モデルの開発

一般に、鉄鋼材料は多結晶体であり、結晶ごとに応力やひずみの分布が存在している。先述した通り脆性破壊は結晶粒界における脆化相を起点として発生することから、塑性変形が付与された際の多結晶体の挙動を正確に把握することが求められる。そこで本研究では結晶塑性理論に基づくモデルの1つである、Strain Gradient Plasticity (SGP)理論を有限要素法に実装することで多結晶体をモデル化し、予ひずみによる材料損傷量や限界破壊条件の変化に対してマイクロメカニズムに立脚した調査を行った。

SGP は 1970 年に確立された理論であり[7]、式(1)に示すような仮想仕事の原理に従い、式(2)のようにひずみ勾配や相当塑性歪をそのまま転位量と解釈することができる[8][9]。

$$\int_{\Omega} [\sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} + q_{ij} \delta \varepsilon_{ij}^p + m_{ijk} \delta \varepsilon_{ij,k}^p] dV + \int_{S^T} [\tilde{M}_{ij} \delta \varepsilon_{ij} + \hat{M}_{ij} \delta \dot{\varepsilon}_{ij}] dS = \int_{S^{ext}} [\sigma_{ij} n_j \delta u_i + m_{ijk} n_k \delta \varepsilon_{ij}^p] dS \quad (1)$$

$$\rho_{TD} = \bar{r} \frac{\eta^p}{b} + [\sigma_{ref} f(\varepsilon^p) / (M a \mu b)]^2 \quad (2)$$

粒内要素および粒界要素を Abaqus のユーザーサブルーチンにて定義し SGP を実装することで、実験に供した多結晶体を定義することに成功した。後に述べる各種実験に関する再現解析を行い、転位の増減に特に注目しながら脆性破壊発生マイクロメカニズムに立脚した考察を行った。

III.高応力多軸度場での予ひずみ履歴が脆化に及ぼす影響

先述した通り、単調な予ひずみが付与された際に靱性が劣化することは経験的に理解されているが、地震が発生したときに加わるような多軸的な繰返し予ひずみが負荷された際の靱性劣化挙動は過去に研究事例が少なくメカニズムが十分に解明されていない。単軸状態における繰返し予ひずみが負荷された際の靱性劣化挙動はSGPを用いて計算される転位密度を用いて定量的に記述することができる可能性が示唆されているが[10]、実際の構造物は常に多軸状態で負荷を受けていることから多軸状態での靱性劣化挙動を調査することが望まれる。

Fig.1(a)に示すような両側切欠き試験片に対して繰返し予ひずみ付与を行うことで多軸状態を形成した。予ひずみは全部で6種類付与されており、いずれも地震等で負荷されるような繰返し塑性変形を再現したものである。予ひずみ試験片からFig.1(b)に示すような破壊試験片を切り出すことでQuasi-CTOD試験を行い延性・脆性遷移温度(DBTT)による比較を行った。その結果、予ひずみを付与した試験片では遷移温度が上昇し、靱性が劣化することがわかった。

また、SGPを用いて予ひずみ試験の再現解析を行い、Fig.2に示すように遷移温度が式(2)で計算される ρ_{TD} を用いて記述することができることを示した。上記の結果から、多軸状態においても単軸状態と同様にSGPを用いて材料損傷量を推定することができることがわかった。更に、単軸状態と多軸状態で転位分布を比較することで同一塑性ひずみレベルにおいては多軸状態の方が損傷を受けやすいことを示した。

IV.異方向予ひずみが脆化に及ぼす影響

ひずみは成分を持つテンソル量であることから、予ひずみ方向は靱性劣化に対して大きな影響を持つと考えられる。本研究では、予ひずみ方向とき裂開口方向を変化させることで予ひずみ方向が靱性劣化挙動および限界応力変化に及ぼす影響について調査を行った。

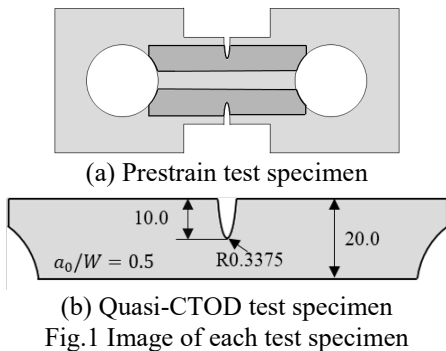


Fig.1 Image of each test specimen

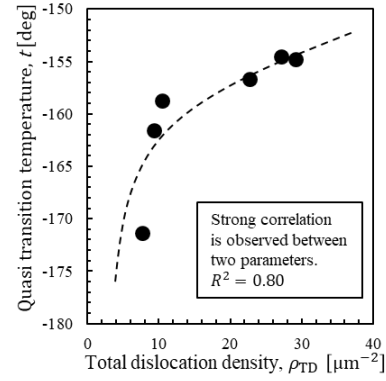


Fig.2 Correlation of ρ_{TD} and DBTT

Fig.3(a)に示すように、予ひずみ方向とき裂開口方向のなす角を θ とし、 θ を $0^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ と変化させた。予ひずみは全て単調引張予ひずみとし、1%, 3%, 7%と変化させた。予ひずみによる加工硬化の影響を調査するために各 θ 、各予ひずみ条件において丸棒引張試験(Fig.3(b))を行い、予ひずみを付与していないものと比較することで引張特性の変化を観察した。

Fig.3(c)に示すような試験片を用いて三点曲げ試験による破壊試験を行った。試験は各 θ において全て同一温度で行っており、限界CTODによる比較を行った。いずれの条件においても限界CTODが減少しており、予ひずみによる靱性劣化が生じていた。また、FEM解析を行うことで限界応力を取得し、条件ごとの比較を行ったFig.4より、限界応力はいずれの条件においても予ひずみ量に対して上昇したが、 θ によってその上昇度合いは大きく異なることがわかる。

限界応力を弾性成分と塑性成分に分解することで限界応力変化メカニズムの考察を行った。その結果、弾性成分の変化は加工硬化による降伏応力上昇並びにバウシニング効果によって説明できることを示した。塑性成分の変化は、転位のパイラップ機構が大きく関与しており、SGPを用いて再現解析を行うことで、 ρ_{TD} の履歴から説明することができることを示した。上記のメカニズムに基づき、式(3)-(7)で示されるように限界応力変化の定式化を行った。

$$\sigma_{cr,est} = \sigma_{cr_{As}} + \Delta\sigma_{el} + \Delta\sigma_{cut-off} \quad (3)$$

$$\Delta\sigma_{el} = \varphi(\eta) \left[Q_\infty (1 - e^{-\beta \varepsilon_{pre}^{pl}}) + \omega(\theta) \bar{\alpha} \right] \quad (4)$$

$$\Delta\sigma_{cut-off} = -\sigma_{cut-off_{As}} \left(f(\varepsilon_{pre}^{pl}, \theta) + g(\varepsilon_{pre}^{pl}) \right) \quad (5)$$

$$f(\varepsilon_{pre}^{pl}, \theta) = \lambda \omega(\theta) \{ 1 - \exp(-\zeta \varepsilon_{pre}^{pl}) \} \quad (6)$$

$$g(\varepsilon_{pre}^{pl}) = \kappa \{ 1 - \exp(-\xi \varepsilon_{pre}^{pl}) \} \quad (7)$$

Fig.5に、限界応力の実測値と、式(3)-(7)から得られた推定値の比較を示す。

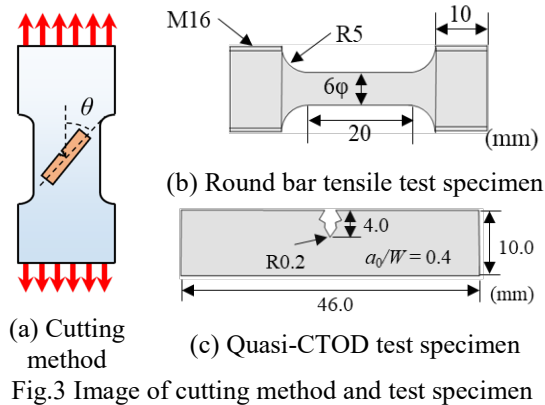


Fig.3 Image of cutting method and test specimen

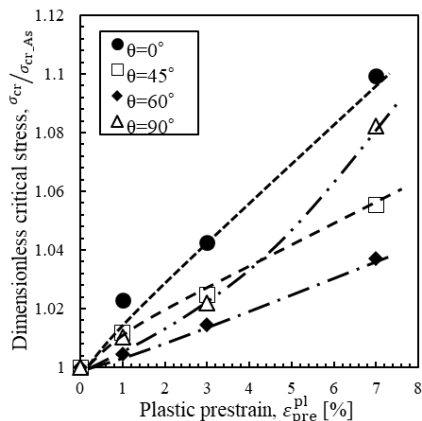


Fig.4 Comparison among prestrain conditions

Fig.5 より限界応力が精度よく推定できていることがわかる。これにより、単調予ひずみの場合であれば、予ひずみを付与していない材料の限界応力、予ひずみ量、予ひずみ方向がわかれば限界応力変化を予測することができることを示した。限界応力に対する過去の知見[4][5][6]に対して一定の説明ができるようなモデルを構築することに成功した[11]。

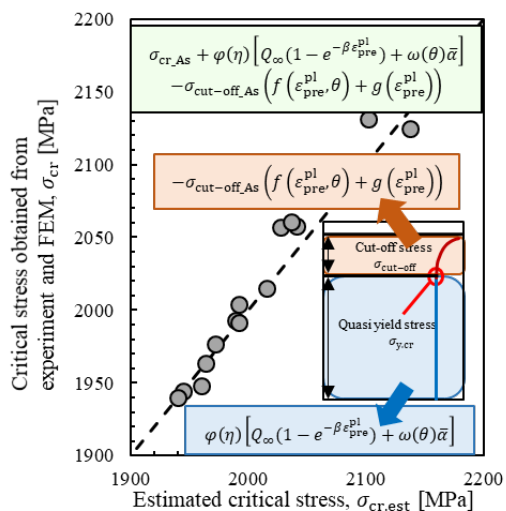


Fig.5 Accuracy of the proposed formula established to estimate critical stress

V. 軟相硬相比率が脆化に及ぼす影響

化学組成によって大きく変化し、その機械的特性はマイクロ組織によって様々である。本研究では、フェライト・パーライト比率が異なる材料について地震を模擬した繰り返し予ひずみを付与することで、軟相硬相比率が予ひずみ脆化に及ぼす影響の調査を行った。3種類の異なるマイクロ組織を持つ鋼材を用意し、それぞれに繰り返し予ひずみを付与、その後シャルピー衝撃試験を実施した。結果として、予ひずみ脆化量はマイクロ組織によって大きく変化することがわかった。これは、相当塑性ひずみによって材料損傷量が決定されるとした、Coffin-Mansonの式[4][5]とは大きく異なる結果であり、非常に興味深い新しい知見である。更に、SGPを用いて様々なマイクロ組織を再現するパラメトリック解析を行うことで、損傷を受けにくい材料についての提案を行うことに成功した。Fig.6に示すように、硬相が連結した材料は、十分な強度を持ち、更に損傷を受けにくい特徴があることを示した[12]。

VI. 析出物が予ひずみ脆化に及ぼす影響

先述した軟相硬相比率の影響に加え、析出物が予ひずみ脆化に及ぼす影響の調査を行った。Martensite-Austenite constituent (MA)が存在する材料では、MAが脆性破壊の起点になりやすく、予ひずみ脆化に対して大きな影響を及ぼすことが予想される。MAの有無による変化を比較するために、MAがほとんど存在しないTMCP材および2相域熱処理を行い、多数のMAを析出させた材料(以下MA材)について引張予ひずみを付与し破壊靱性試験を行った。その結果、通常のTMCP材とMA材の間で、靱性劣化挙動には大きな変化が生じないことがわかった。また、限界応力についての計算を行うことで、TMCP材とMA材において、ともに予ひずみによって限界応力が上昇することを示した。

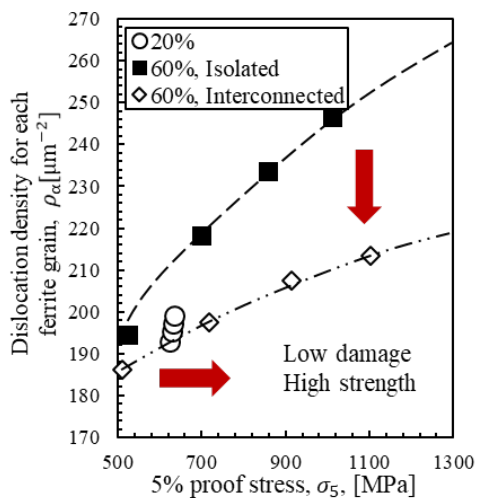


Fig.6 Material damage evolution for various microstructure

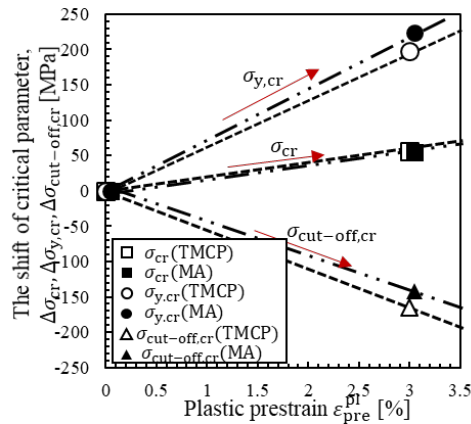


Fig.7 Change of essential critical parameters after prestrain

更に先述したように、限界応力を弾性成分と塑性成分に分解することで、Fig.7 に示すように、TMCP 材と MA 材との間で限界応力変化メカニズムにおいても差が存在しないことを示した。このことは、特に溶接熱影響部靱性の観点で問題視されることの多い MA を多く含む組織であっても、予ひずみ付与時の脆化幅については、MA フリー材と同様であることを示唆しており工業的に重要である。

VII.様々な負荷履歴が限界破壊条件に及ぼす影響

これまでに得られた結果の整理を行い、様々な負荷履歴が限界応力に及ぼす影響についての考察を行った。予ひずみについては、限界応力を弾性成分と塑性成分に分解することで統一的に説明できることを示した。また、応力多軸度が異なる試験片について検討を行い、応力多軸度が上昇することで限界応力が上昇することを示した。更に、Fig.8 に示すように、ワイブル応力を用いることで、予ひずみ量がある程度小さければ限界応力を一定の値で整理できることを示した。更に、応力多軸度についても、ワイブル応力を用いることで一定の値で整理を行うことが出来ることを示した。これまでに統一的に整理されてこなかった負荷履歴が限界応力に及ぼす影響について、メカニズムの解明を行い、一定の整理を行うことに成功した。

VIII.ワイブル応力クライテリオンへのエンジニアリングへの活用

これまでに得られた知見のエンジニアリングへの活用を行った。ある程度の予ひずみ量であればワイブル応力を用いることで一定の値に整理できることを利用し、溶接残留応力を緩和させる LC 処理についての最適化を行った。溶接継手は圧縮残留応力の存在から、CTOD 試験に必要な疲労き裂が直進しないという問題があり、LC 処理はその問題の解決手法の一つである。

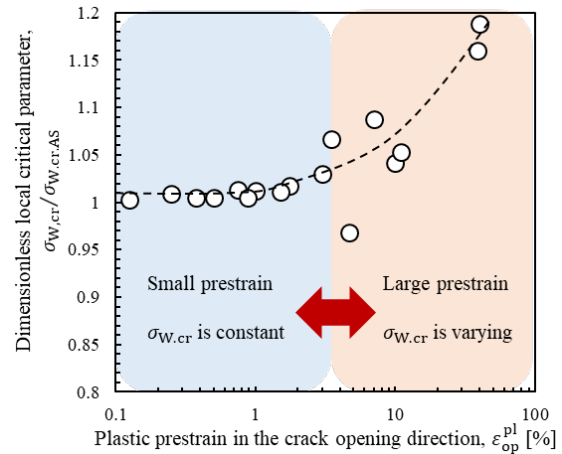


Fig.8 Change in critical Weibull stress after various prestrain

従来の LC 処理では、LC 処理を行うことで靱性が劣化してしまうことから、過度に安全側の評価を行ってしまっていたが、ワイブル応力クライテリオンに基づく最適化を行うことで、靱性が劣化しない LC 処理条件の提案に成功した。このように、本研究で得られた知見をエンジニアリング分野へ活用することが出来る一例を示した。

IX.まとめ

本研究では、SGP を活用することで、より高精度な材料損傷則の構築に成功し、更に様々な予ひずみ条件が脆化に及ぼす影響について統一的な整理を行うことに成功した。更に、予ひずみが付与された際の限界応力変化の定式化に成功し、またマイクロ組織が予ひずみ脆化に及ぼす影響についても数多くの新たな知見を得ることが出来た。これらの知見は、地震波浪などを多く経験する社会インフラ構造物の損傷診断に大いに進歩をもたらしたと考えられる。

参考文献

- [1] E. Smith, Physical basis of yield and fracture conference proceeding, 36-46 (1966)
- [2] L. F. Coffin et al, Transaction of the ASME, 76, 931-950 (1954)
- [3] S. S. Manson et al, Experience Mechanics, 7,193-225 (1965)
- [4] H. Yoshinari et al, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, 190, 559-567 (2001)
- [5] T. Tagawa et al, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 2, 429-434 (1996)
- [6] S. R. Bordet et al, Fracture of nano and engineering materials and structures, ECF 16, 853-836 (2006)
- [7] M. F. Ashby, Philosophical Magazine, 399-424 (1970)
- [8] P. Gudmundson, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 52, 6, 1379-1406 (2004)
- [9] E. Martínez-Pañeda et al, International journal of Solids and Structures, 509, 208-215 (2015)
- [10] H. Kosuge et al, Materials and Design, 185, 108222-108231 (2020)
- [11] H. Kosuge et al, Crystal, 10, 867 (2020)
- [12] H. Kosuge et al, Materials & Design (Under Review)