

## 「予歪を受けた鋼材の延性低下メカニズムに関する研究」

システム創成学科 環境・エネルギーシステムコース 10753 菅満春  
指導教官 吉成仁志助教授

## 1. 緒言

現在、構造材料として鉄鋼が多く使われている。その鋼構造物の安全性に関して問題視されているもののひとつに予歪と呼ばれるものがある。予歪とは、鋼構造物が大荷重を受けることによって生じる数十%にもものぼる大規模な塑性変形のことをいう。一般的には予歪を受けた鋼材は延性や靱性が低下することが知られている。しかし、予歪による鋼材の延性低下のメカニズムについては未だに不明な点が多く、定量的な評価手法も確立されていない。

## 2. 既往の研究

これまでに、延性破壊の限界相当塑性歪は、応力三軸度が高くなるにしたがって指数関数的に減少することが知られている（これを延性限界曲線とよぶ）。島貫らは、応力三軸度 - 限界相当塑性歪関係で表される延性限界曲線を次式により近似的に表すことができると考えた。

$$\varepsilon_f = \alpha \exp\left(-\beta \frac{\sigma_m}{\sigma_e}\right) \quad (1)$$

ここに、 $\alpha$  と  $\beta$  は正の定数、 $\sigma_e$  は相当応力、 $\sigma_m$  は平均応力、 $\varepsilon_f$  は限界相当塑性歪である。

榎並らは、予歪による鋼材の延性低下について、この延性限界曲線に注目した。そして、延性き裂発生の評価に延性限界曲線を適用する手法について研究を行った。供試材には As-rolled 鋼材が用いられた。研究の結果、予歪によって延性が低下することが確認された。榎並らは延性が低下する大きさが予歪量にほぼ比例していることに着目し、相当塑性歪 - 応力三軸度履歴に、予歪分をあらかじめ加えておき、限界点までの履歴を記録した。その結果、ほとんどのプロット点が図 1 に示してある 0%予歪材の延性限界曲線およびそのバンド上に乗った。このことから「予歪を履歴の一部として考慮することで延性破壊を母材の延性限界曲線で統一的に評価できる」と主張した。

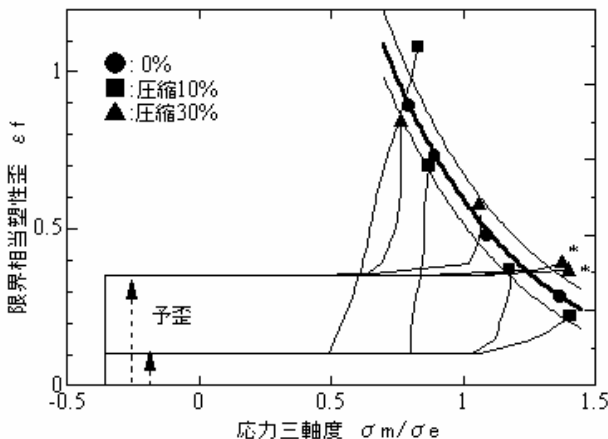


図 1 予歪を考慮した負荷履歴

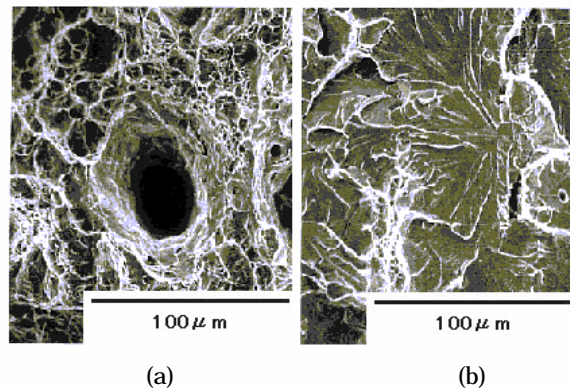


図 2 圧縮 30%2R 試験片, As-rolled 鋼材

加えて、圧縮予歪による延性低下のメカニズムを解明するために、破面観察が行われた。図 2(a)のようなディンプル破面に混じって、図 2(b)のようなリバーパターンが多数観察され、へき開が生じていることが確認された。このように伝播停止したへき開き裂を局所へき開き裂と呼ぶ。このような破面は他の条件の試験片でも観察された。このことから「予歪による延性低下は局所へき開き裂の発生に起因している」と主張した。

本研究は上記の 2 つの仮説を検証することを主な目的とする。また、その結果から予歪による鋼材の延性低下のメカニズムを解明するとともに、延性低下の定量的評価手法の確立することを最終的な目的とする。

### 3. 研究方法

供試材として TMCP 鋼材 ( Thermo Mechanical Control Process : 熱加工制御 ) を用いる。予歪量は 0% ( 母材 )、圧縮 10%、圧縮 30%、引張 10% の 4 種類に設定した。TMCP 鋼材は高靱性材料であり、局所へき開き裂の発生が困難である。延性低下が局所へき開き裂の発生に起因しているとする仮説が正しいければ、局所へき開き裂が発生しなければ延性は低下しないはずである。

#### Step 1 円周切欠付丸棒引張試験

円周切欠付丸棒の引張試験を延性限界曲線を求めるために行った。切欠半径を変えることによって異なる三軸応力状態におけるデータを得ることができる。試験片の形状を図 3 に示す。標点間距離は母材、引張予歪材は 40mm、圧縮予歪材は 18mm に設定した。また、切欠半径は 1, 2, 5mm の 3 種類とした。これらの試験片に 1mm/min のクロスヘッド変位速度で負荷し、破断までの標点間伸びと荷重の変化を記録した。

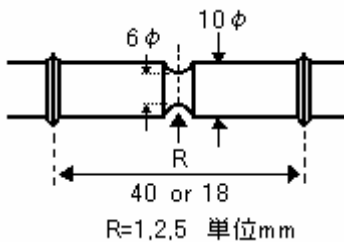


図 3 円周切欠付丸棒試験

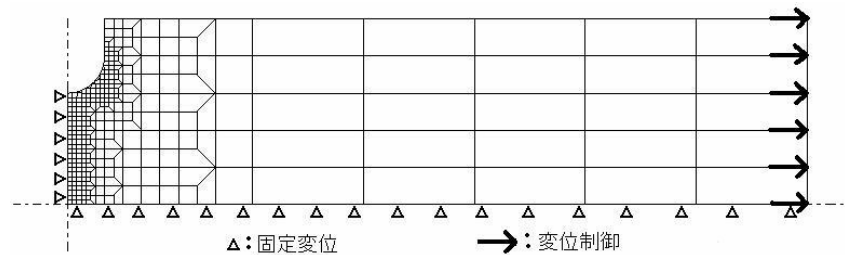


図 4 要素分割図(母材、引張予歪材 1R 試験片)

#### Step 2 数値解析

有限要素法 ( FEM ) による数値解析を行った。図 4 に示すように試験片形状の 1/4 のみをモデル化し、軸対称とした。図 4 は母材と引張予歪材に使用した 1R 試験片の要素分割である。負荷条件を実際の試験と同様に設定し、応力、歪分布を解析した。延性き裂発生点に対応する時点での応力三軸度と相当塑性歪を求め、延性限界曲線を作成した。その結果から予歪により延性がどの程度低下するかを調査した。

#### Step 3 破面観察

SEM ( scanning electron microscope : 走査型電子顕微鏡 ) を用いて観察を行った。各試験条件において局所へき開き裂の発生の有無を確認することを目的とした。

以上の研究手法は、複並らによって行われた As-rolled 鋼材に関する研究とほぼ同様である。TMCP 鋼材と As-rolled 鋼材における結果を比較し、より信頼性の高い知見を得る。

### 4. 研究結果

図 5 に圧縮 10%2R 試験片を例として、荷重 - 伸び関係について引張試験の結果と数値解析の結果を併記する。数値解析の結果が試験結果とよく一致している。このことから数値解析の結果の妥当性が保証される。また、本研究では試験結果の荷重 - 伸び関係の変曲点を延性き裂発生点と定義する。これらのことは、すべての試験条件において同様である。数値解析により変曲点における応力三軸度 - 限界相当塑性歪を求めた。

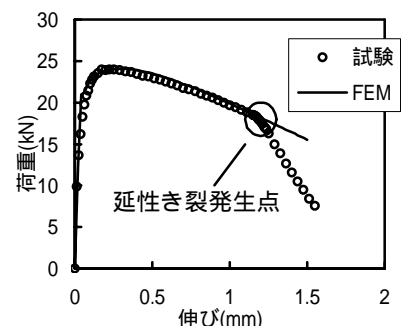


図 5 荷重 - 伸び関係(圧縮 10%2R)

図 6 に全試験片の延性き裂発生条件をプロットしたものを示す。

図中の曲線は、このプロット点に式(1)を用いてフィッティングさせることによって得られた延性限界曲線である。多少のばらつきはあるものの、すべてのプロット点が 1 本の延性限界曲線上あるいはその付近に集まった。したがって、予歪による延性限界曲線の低下は無かったという結果が得られた。

図 7 に圧縮 30%1R 試験片の破面の拡大写真を示す。数値解析の結果から延性き裂発生時の応力三軸度が最も高く、へき開が生じやすい条件である圧縮 30%1R 試験片でさえ局所へき開き裂は観察されなかった。他の条件でも同様であった。すべての試験条件において延性の低下は無かったこととあわせると予歪による延性低下は局所へき開き裂の発生に起因しているという結論が導かれる。

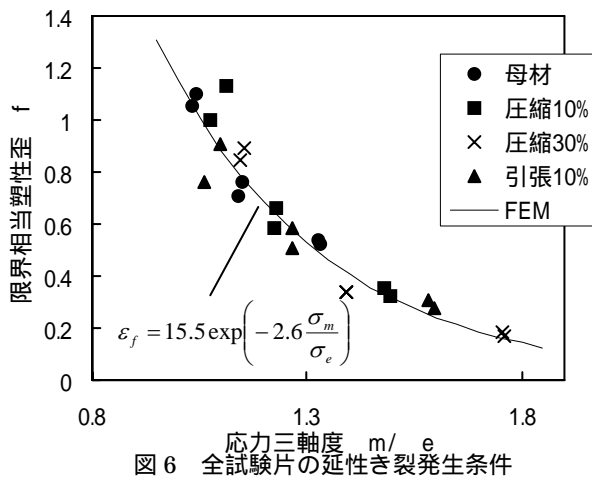


図6 全試験片の延性き裂発生条件

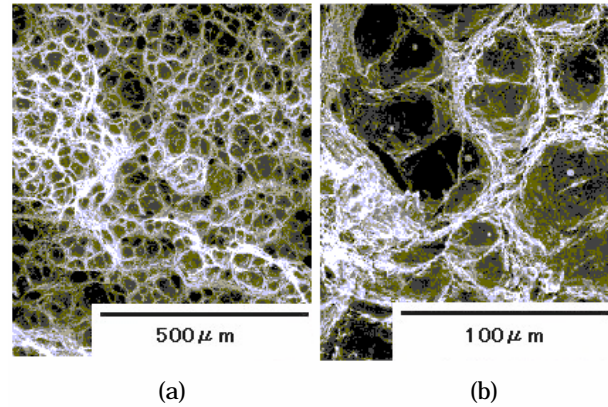


図7 圧縮30%1R試験片、TMCP鋼材

## 5. 考察

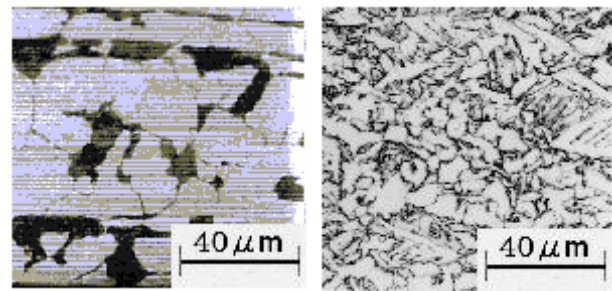
### 5.1 延性低下のメカニズム

通常の延性破壊では大きな塑性変形を起こした時点で介在物等からポイドが発生する。しかし、予歪を受けた As-rolled 鋼材では、塑性変形の初期段階でへき開が生じ、へき開き裂の伝播が停止した（局所へき開き裂）。そして、この局所へき開き裂を起点としてポイドが発生、成長して、最後にポイドが連結することで破断したと考えられる。つまり、局所へき開き裂を起点として通常より早期にポイドが発生することで、延性破壊のプロセスを促進したことが延性低下のメカニズムであると考えられる。

### 5.2 鋼種依存性

予歪による延性低下の有無（局所へき開き裂の発生の有無）は鋼種に依存すると考えられる。

結晶組織について見ると、As-rolled 鋼材はフェライトとパーライトの二相鋼材である（図8(a)）。一方、TMCP 鋼はベイナイトの単相鋼材である（図8(b)）。二相構造の場合は圧縮予歪を加えると、相の硬さの違いから変形にも違いが生じる。そのため、予歪材の結晶構造が乱れて微視



(a)As-rolled 鋼材 (b)TMCP 鋼材

図8 結晶組織

的には不均質な塑性変形になる。その結果、再負荷や逆負荷を行った際に、局所的な応力の集中が生じ、局所へき開き裂の発生につながったのではないだろうか。

結晶粒径にも違いはある。図8を見れば明らかのように As-rolled 鋼材は粗く、TMCP 鋼材は細かい。一般的に、結晶粒の微細化は、靱性を高めることが知られている。TMCP 鋼材は、予歪によって多少靱性が低下したとしても、まだ十分に靱性が確保されていた。よって TMCP 鋼材では局所へき開き裂が観察されず、延性の低下が無かったと考えられる。

## 6. 結言

本研究で得られた知見を以下に要約する。

1. TMCP 鋼材においては予歪による延性の低下が認められなかった。このことから、「予歪を履歴の一部として考慮することで延性破壊を母材の延性限界曲線で統一的に評価できる」とした仮説には一般性が無いことを確認した。
2. As-rolled 鋼材では予歪により局所へき開き裂が発生し、延性が低下した。一方、TMCP 鋼材では予歪による局所へき開き裂の発生は無く、延性は低下しなかった。このことから、「予歪による延性低下は局所へき開き裂の発生に起因している」とした仮説の正当性を確認した。
3. 予歪を受けた鋼材の延性低下のメカニズムは、局所へき開き裂の発生に伴う、ポイド発生と成長の促進であると考えられる。