

(平成 31 年 1 月 31 日提出)

Keywords: 鋼構造物余寿命, 材料損傷, 予ひずみ, デジタルツイン, 脆性破壊

1. 序論

近年、液化天然ガス需要の高まりから地上ガスタンクなどの鋼構造物の需要が拡大している。地上構造物は地震が起きたときに繰り返し予ひずみが負荷されるため損傷が蓄積する。リアルタイムで材料損傷を計算し予測するデジタルツイン等のマルチスケール数値モデリングを用いて鋼構造物の余寿命を推測するためには、予ひずみによる材料損傷モデルを確立することが重要である。しかし、予ひずみに対する研究は数多くなされているが、未だに単一ひずみ条件さえ統一した見解は得られておらず、余寿命の推測や安全評価を行う上で極めて重要な繰り返し予ひずみなどの複雑な予ひずみパターンに対応可能なモデルは確立されていない。

本研究では、繰り返し予ひずみや、引張方向に対して 90° 傾いた予ひずみ等複雑な予ひずみを付与した試験片における破壊靱性試験結果を整理することで、脆性破壊に対する限界条件がどのように変化するかを考察し、最終的には同条件下における材料損傷モデル構築を目指すものである。

2. 繰り返し予ひずみによる材料損傷

既存の知見として、マンソンコフィン則[1]と呼ばれる、繰り返し予ひずみが負荷された時、材料損傷は相当塑性ひずみ量に依存するという考え方があり。しかし実際には同じ相当塑性ひずみ量でもその負荷する順番によって材料損傷が変化すると考えられる。そこで実際に様々な繰り返し予ひずみを付与した試験片に対して静的曲げ試験を行い靱性値の変化を比較した。

実験内容としては、Fig. 1(a)に示す試験片に 6 パターンの予ひずみ付与を行い、そこから Fig. 1(b)に示すような曲げ試験片を切り出して疑似的な CTOD 試験を行った。限界 CTOD 値 0.1mm を示す遷移温度のシフト量を主な評価パラメータとした。平行して連続体力学に基づく FEM 解析と Conventional Mechanism based Strain Gradient Plasticity(CMSGP) (Martinez ら[2])に基づく FEM 解析を行った。FEM 解析では転位密度に関する計算を行い、予ひずみ付与による粒界近傍の転位密度増加 (GN 転位および SS 転位の総和) を材

料損傷量の指標の一つとした。

実験結果および FEM 解析結果を Fig.2 に示す。予ひずみを付与することで明らかに靱性が低下し、また予ひずみ条件ごとに明確な靱性の違いが見られた。CMSGP に基づいた FEM 解析から得られた転位密度の値と疑似的な CTOD 試験における遷移温度との間には明確な相関が見られ、転位密度を材料損傷量の指標とすることへの妥当性が確認された。結果として、最終回予歪方向および予歪量が重要な脆化因子となることが判った。繰り返し予ひずみによる材料損傷の載荷パターンへの依存性を示すことができた。

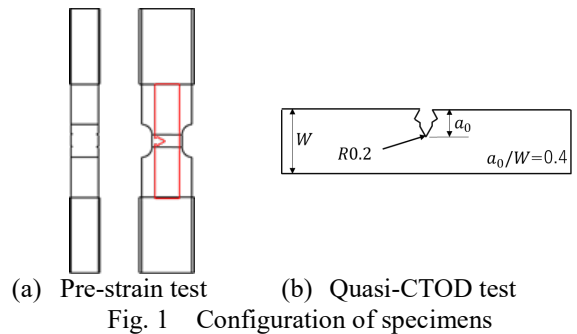


Fig. 1 Configuration of specimens

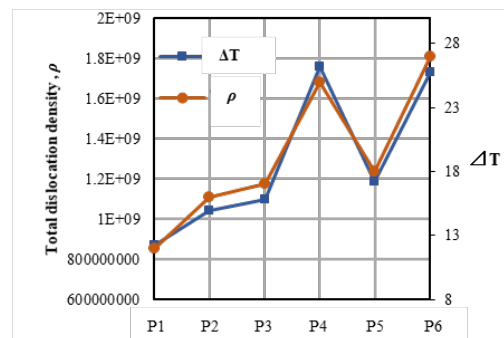


Fig. 2 Comparison of total dislocation density and transition temperature

3. 予圧縮による限界応力の変化

さらに実践的な靱性変化に対する評価を行うために、様々な予ひずみを付与した際の限界条件変化の調査を行った。実験内容としては、大きさの違う 3 種類の圧縮予ひずみを付与した試験片から切り欠き丸棒試験片を切り出し、 -196°C で引張試験を行うことで限界応力の取得を行った。

また圧延のみの TMCP 鋼と二相域熱処理を行った試験片を用意し、限界応力を比較した。圧縮予ひずみは引張試験を行う方向と平行なものと、垂直なものを与えており、予ひずみの方向が限界条件に及ぼす影響についても調査した。

実験の結果、圧延のみのものと 680°C に二相域熱処理を施したものについては、予ひずみの方向にかかわらず限界応力が上昇し、750°C に熱処理を施したものでは限界応力が変化しなかった。750°C のものはシャルピー試験の遷移温度が 40°C 前後と -196°C に対し、非常に高温であるため、試験温度が適当な評価温度ではなかったことが原因と考えられる。

Fig. 2 に、圧延まま(S1AR)と 680°C 熱処理の鋼材(S168)における限界応力と予ひずみの関係を示す。Fig. 2 に示されるように、平行に予ひずみを負荷しているものの方が垂直に負荷しているものよりも限界応力の上昇幅が大きいことがわかった。

圧縮予ひずみにより限界応力が上昇するメカニズムとして背応力の更新を考察した。これは、最初の圧縮予ひずみを与えたときと同程度のパイラップが行われるまでは材料損傷が進行しないという考え方である。脆性破壊はパイラップされた転位を駆動力として発生すると考えられており[3]、移動硬化則によりバウシンガー効果が生じている間は転位のパイラップは生じない。よってマイクロクラック発生条件に到達するまでに、単純引張試験に対してより多くの相当塑性ひずみが蓄積されることとなる。限界応力と相当塑性ひずみは一対一対応の関係にあり、相当塑性ひずみが増加すると限界応力も増加する。従って圧縮予ひずみを付与したことでより多くの相当塑性ひずみが蓄積し、限界応力が上昇したと考察した。また、予ひずみ方向が異なる場合は結晶のすべり面に着目し、バウシンガー効果が発生する確率を議論することで、限界応力の上昇量を評価できることを確認した。Fig. 3 に示されるように、S1AR の方が S168 に対して限界応力の上昇量が大きいことがわかる。今回の限界応力評価に用いた -196°C の平滑丸棒引張試験における応力ひずみ曲線から、真応力真ひずみ換算を行った後 Swift フィッティング実施した応力歪曲線における加工硬化量と、予圧縮ひずみの場合の局所限界破壊応力の上昇には良い対応関係が見られた。このことから、加工硬化成分が限界応力の上昇に対して支配的であるという考察が得られた。つまり単純な引張試験を行うことで限界応力の上昇量を簡易的に予測できることが確認された。

4. 結論

今回の研究で、複雑な予ひずみ条件に対する材料損傷モデルや、限界条件変化メカニズムに対して新しい知見が得られたが、一方で様々な課題が

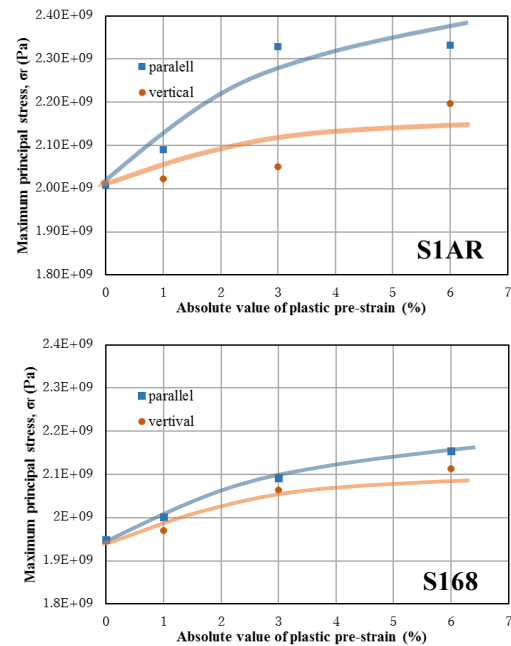


Fig. 3 Change of critical stress after pre-strain

存在する。繰り返し予ひずみについては、遷移温度によって靱性値の変化を議論したが、限界応力に基づく考察を行っていない。逆に、方向を変化させた予ひずみについては限界応力に基づいた考察は行ったが遷移温度に基づいた議論は行っていない。予圧縮ひずみの量、方向に対して遷移温度がどのように変化するのか、また繰り返し予ひずみを付与すると限界応力がどのように変化するのかといった知見を得ることができていない状況である。

しかし、本研究では様々な課題を内包しつつも、複雑な予ひずみ条件における材料損傷則を導き出し、また限界応力が上昇するメカニズムについて定性的に説明することに成功した。これまでに統一的に整理されていなかった予ひずみによる影響を一般化するうえで大きな進歩をもたらしたと考えられる。この成果が、今後の社会においてデジタルツイン等によって適切な安全評価や設計を行う際に非常に重要な役割を担うことを願っている。

参考文献

- [1] S.S.Manson et al, A COMPLEX SUBJECT – SOME SIMPLE APPROXIMATIONS, Society for Emerimental Stress Analysis Cleveland, 1965
- [2] Martinez et al, Modeling damage and fracture within strain-gradient plasticity, International journal of Solids and Structures, vol 509, pp, 208-215, 2015
- [3] Smith, E., The nucleation and growth of cleavage fracture in high carbon bainite. , Materials Science and Engineering A, 158, 11-19, 1966.