

複合多軸応力下での疲労強度予測手法に関する予測

Prediction of Fatigue Strength under Combined Multiaxial Stress

旭川工業高等専門学校 生産システム工学専攻 2年 稲垣 颯馬 指導教員 杉本 剛

背景・目的

- 力が加わる構造物においては、その形状や負荷の複雑さから応力が多軸性となり、構造物の疲労強度を精度良く評価するために、多軸性を理解して疲労強度評価手法を適用する必要がある。様々な評価手法に関する研究が行われている[1]
- 本研究では、浸炭焼入熱処理を行った場合を対象として、残留応力が生じる。これが金属構造物の強度へ変化をもたらすかについて考えていく。
- 熱処理シミュレーションより多軸性の応力状態を把握して得られた結果から複合多軸応力下での疲労強度予測する手法の確立を行う。
- これにより以前の設計では余裕率を持たしていた部分を減らし、コスト製品重量の削減へつなげると考えられる。
- 疲労試験と熱処理シミュレーションで求めた多軸応力分布に相関性があることを示し、多軸性の応力状態下での疲労強度評価手法を明らかにする。

研究の流れ

1. 試験片製作

使用材料：SCr420H材

- 図1のような寸法の単軸引張試験片を製作する

2. 浸炭焼入処理

- 真空浸炭装置でアセチレンガスを利用して温度930[°C]で浸炭・拡散を行い、真空状態のまま60[°C]以下にする。
- 850[°C]の焼入装置から60[°C]の油に焼入れる

3. 引張試験

試験条件 試験速度：1[mm/min]

- つかみ部分の硬化層を切削した試験片を取り付け、試験を行う。
- 破断面の観察

4. 腐食試験、硬さ試験

ビッカース硬さ試験力：300[g] 時間：10秒間

- 表面処理後ナイタールを使用して腐食させ、観察する。
- ビッカース硬さ試験機にて試験を行う。

5. 熱処理シミュレーション

要素数：267858 節点数：55530
くびれ部分のメッシュ細かさ：0.1倍
シミュレーションソフトウェア
「DEFORM-HT VER. 12.0.1®」

6. 修正Goodman線図

試験から得られた引張強さと過去のSCr420H材浸炭焼入れにおける疲労強度の実験結果[2]をもとに修正Goodman曲線を描く。

7. 疲労試験

試験条件 試験速度：500[mm/min]
最大値：1.18[mm] 時間：0.1[sec]
最小値：0[mm] 時間：0.2[sec]

- 試験片を取り付け、試験を行う。
- 破断面の観察

実験手順

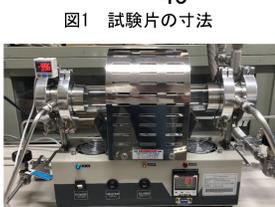
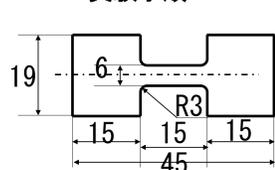


図3 万能試験機（島津製作所 AG-X 250kN）

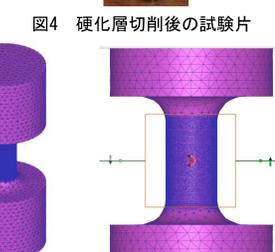
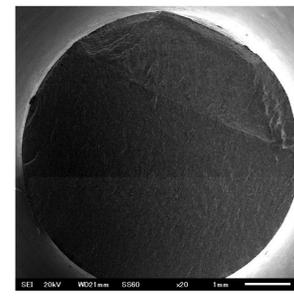
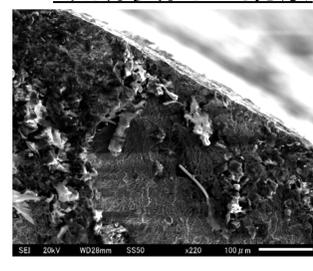


図5 メッシュ全体 図6 メッシュ0.1倍の部分

実験結果

破断面の観察



- 引張試験での拡大写真から粒界破断が確認、全体写真から延性破断の確認 → 表面起点の破壊から内部へ進んでいったと考えられる。
- 疲労試験では破断起点から破断終点にかけて少しずつ割れていくストライエーション様子は確認できなかった。

引張試験

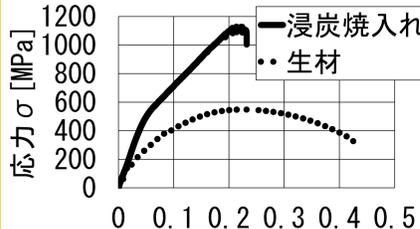


図12 応力-ひずみ曲線

- 浸炭焼入れは引張強さが1127[MPa]、破断時のひずみは0.23となった。
- 生材では引張強さが548[MPa]、破断時のひずみは0.425となった。
- ⇒浸炭焼入れの試験片が硬く脆い
- 浸炭焼入れの最後に上下の移動は表面へのひび割れ（クラック）が生じたことによる

熱処理シミュレーションでの応力状態

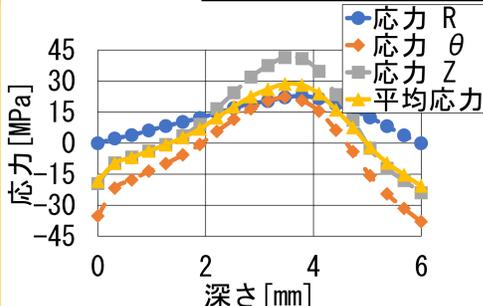


図13 応力状態グラフ

- 試験片の組織がベイナイトであったものが浸炭焼入れの効果より表面においてマルテンサイト組織へと変化する。
- 表面での組織変化の影響からマイナス応力が発生しており、残留応力に相当する平均応力は-20.67[MPa]であった。

修正Goodman線図

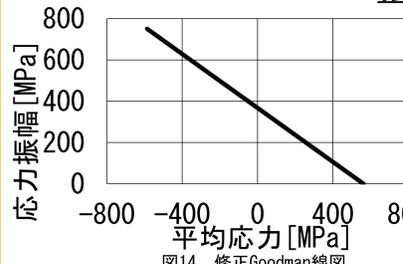


図14 修正Goodman線図

- 引張試験から得られた引張強さと疲労限度を直線で結び修正Goodman線図が描ける。
- 熱処理シミュレーションでの残留応力を加味することで浸炭焼入れ前の疲労限度を求めることができる。
- 生材の疲労限度は367.53[MPa]になると予測した。

疲労試験

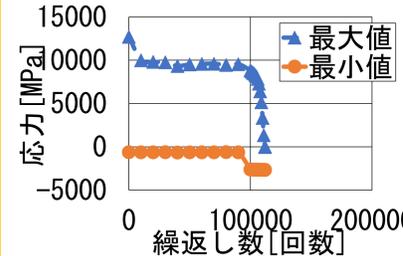


図15 修正Goodman線図

- 熱処理シミュレーションでの結果を考慮した修正Goodman線図によりSCr420Hの生材における疲労強度の予測が正しいかどうか確認するため疲労限度程度の応力値で疲労試験を行った。
- 10⁷回程度の寿命となると予測していたが本実験では1.12×10⁵回で破壊した。

実験結果

硬さ試験

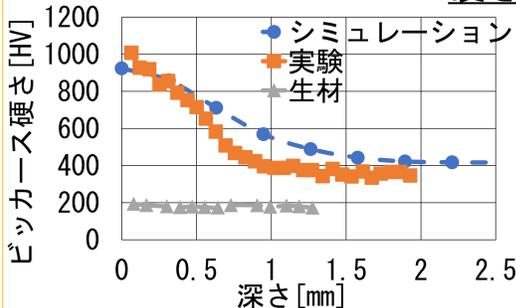


図7 硬さ-深さグラフ

- シミュレーションと実験結果を比較すると表面付近の0.06[mm]は実験値が1000[HV]を超えてシミュレーションより大きくなったが、0.5[mm]まではシミュレーションと近い値を確認できた。
- 0.5[mm]からはシミュレーションより早く実験値が低下した。

腐食試験

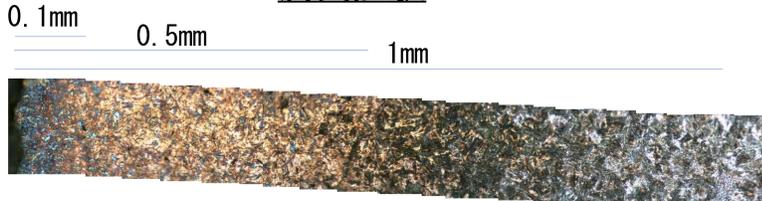


図8 硬さ-深さグラフ

- 硬さ試験からも確認できたように表面近傍に対しては硬化層となっており、マルテンサイト主体の組織であり、正常に焼入れができていたことが確認できた。

考察

- 硬さ試験において表面はシミュレーションと近い値を得ることができたが、深さ0.5[mm]からはシミュレーションより早く実験値が低下した。本研究では疲労強度予測であることから金属表面における強度を重要視することからシミュレーションと実験値は定性的に再現できたといえる。
- 本研究では試験片の表面強度を重要視するため熱処理シミュレーションの表面付近におけるマイナス応力は疲労強度の向上に影響していると考えられる。
- 引張試験、参考文献による疲労試験と熱処理シミュレーションの残留応力を考慮した修正Goodman線図にて浸炭焼入れ前の疲労限度が予測できたことから、この考え方から浸炭焼入れ後の疲労限度が予測できると考えられる。
- 疲労試験の10⁵回に試験機の都合のため一度試験片を取り外し、伸びの位置を考慮して試験を再開したが、加わる応力が取り外し前と後で変化してしまい短い時間で破壊してしまったことに繋がったと考えられる。また、可能性として破損起点にインクルージョン（介在物）があり疲労破損が早く起きたことも考えられる。

今後の展望

修正Goodman線図に熱処理シミュレーションの残留応力を考慮して予測した疲労限度が正しいか確認する疲労試験にて試験片取り外しによって正しい結果を得られなかったため、来年度この研究を引き継ぐ学生がいれば、課題点を修正しさらに研究を進めてもらいたいと思う。