

## 繰返し塑性ひずみに伴う鋼材表面の微視的形狀変化と亀裂形成

東京工業大学 学生会員 ○木村 優里  
 横浜国立大学 正会員 田村 洋  
 東京工業大学 正会員 佐々木 栄一

## 1. はじめに

繰返し塑性ひずみ下の鋼材について、巨視的な低サイクル疲労亀裂発生に至るまでの鋼材表面の微視的形狀変化を把握することで、亀裂発生メカニズムの解明の手掛かりを得られる可能性がある。本研究では、大振幅の繰返し塑性ひずみを導入可能な鋼製供試体とレーザースキャニングによる表面形状の詳細な計測により、繰返し塑性ひずみに伴う鋼材表面の微視的形狀変化を追跡した。そして、圧縮変形下での鋼材表面におけるしわの発生の有無を明らかにするとともに、表面の微視的な変形履歴と低サイクル疲労亀裂発生の関係性を検討した。さらに、どのような因子が表面形状変化に影響を及ぼすのかについても検討した。

## 2. ひずみ履歴の付与と微視的 surface 形状の抽出方法

本研究では野村らの検討で用いられた手法<sup>1)</sup>を踏襲し、図1に示す形状の平板状供試体両端を掴み、圧縮側片振りの繰返し強制変位を付与し、供試体に座屈変形を繰返し発生させることにより大振幅繰返し塑性ひずみを与えた。そして、図中の(1)部表面において、低サイクル疲労亀裂が発生するまでの微視的 surface 形状変化を追跡した。ここで、全ての供試体の荷重は準静的に変位制御によって行い、強制変位は図2に示すように片振りの三角波として付与した。

本研究で検討した供試体は4種類あり、その条件は表1に示す通りである。供試鋼の「S490」と「S400」はそれぞれSM400AとSM490Aの規格値を満たしている。表面処理については、「機械研磨」ではアルミナ質の研削材を用いて鏡面仕上げとし、「化学研磨」ではその鏡面仕上げの後に加工硬化層の除去を目的により供試体表層約100 $\mu\text{m}$ が化学研磨されている。変位範囲は地震時における鋼部材の塑性変形を想定し5mmまたは10mmとした。

供試体表面形状はレーザ変位計をスキャニングすることで計測し、取得した曲面データに対しハイパスフィルターをかけ、図3のような微視的 surface 形状を抽出した。図中の「original」は計測原曲面データ、「macro」は供試体の巨視的な座屈変形、「micro」は「original」から「macro」を差し引き抽出した微視的 surface 形状である。

さらに、本研究では、各供試体の各サイクルについて、レーザースキャニングによる

供試体表面形状計測データから、供試体中央切り欠き部中心(圧縮側)での表面曲率を算出することで、その場所での長手方向ひずみの値を推定し、「ひずみ評価値」とした。このとき、その推定精度は有限要素解析結果と概ね一致することを確認している。なお、供試体の長手方向、幅方向とは、それぞれ、図4中の「Longitudinal」、「Lateral」の矢印が示す方向のことである。

## 3. 供試体の巨視的変形と亀裂発生状況

荷重実験における供試体変形として、供試体S490-M-10の事例を図5に示す。圧縮後にあたる0.5サイクル後に大きな座屈変形が発生し、引張後にあたる1サイクル後においても面外塑性変形が残留していた。その後の荷重や他の供試体においてもほぼ同様な変形が観察された。(1)部表面の巨視的な亀裂について

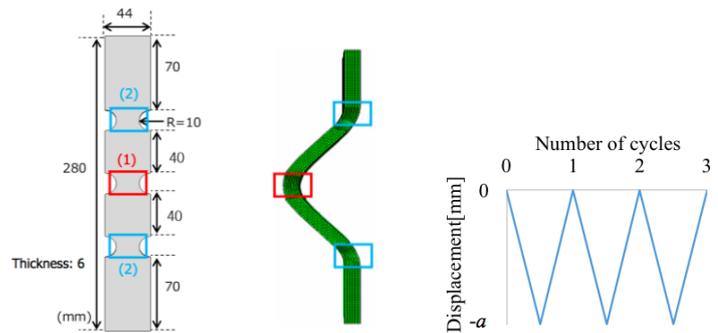


図1 供試体形状と座屈変形 (a) 寸法 (b) 変形後の側面図 (c) 付与したチャック部の変位履歴

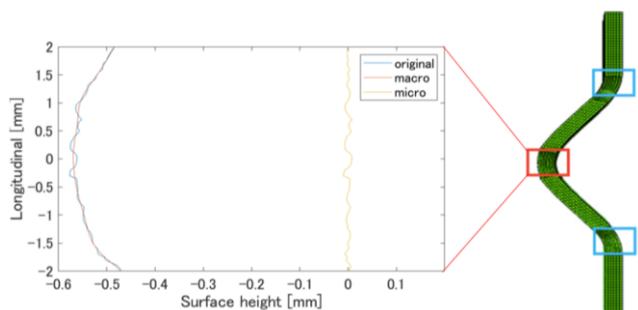


図3 微視的 surface 形状の抽出 (黄色線)



図4 長手方向と幅方向 (a) 荷重前 (b) 0.5サイクル後 (c) 1サイクル後  
 図5 供試体変形状況(供試体:S490-M-10)

キーワード 鋼材, 繰返し塑性ひずみ履歴, 微視的 surface 形状変化, 低サイクル疲労  
 連絡先〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 M1-23 東京工業大学佐々木栄一研究室 TEL 03-5734-3099

表 1 供試体の条件

| 供試体       | 供試鋼  | 表面処理 | 変位範囲<br>$a$ [mm] |
|-----------|------|------|------------------|
| S490-C-5  | S490 | 化学研磨 | 5                |
| S490-M-5  | S490 | 機械研磨 | 5                |
| S490-M-10 | S490 | 機械研磨 | 10               |
| S400-C-5  | S400 | 化学研磨 | 5                |

は、S490-C-5では55サイクル、S490-M-5では43サイクル、S490-M-10では12サイクル、S400-C-5では55サイクルで確認され载荷を終了した。また、供試体S490-C-5、S490-M-10における载荷に伴うひずみ評価値の変化は、図6に示す通りであり、その他2つの供試体についてはS490-C-5と同様な値の変化を示した。

4. 微視的形狀変化と亀裂発生との関係性

(1) 鋼材表面に現れたパターンとその変化

各供試体表面の载荷に伴う微視的形狀変化を図7に示す。これを見ると、(e)以外の全ての図において、载荷方向に直交する方向に縞状のパターンが取得され、ゴム材料等で報告されているような surface instability<sup>2)</sup>によって発現したしわにあたると思われる。また、鋼種、表面処理、ひずみ振幅のそれぞれが鋼材表面のパターン形成に及ぼす影響は、明瞭には確認されなかった。なお、490-M-5では評価位置がずれてしまった可能性があり、(e)において他と異なるパターンが得られたとも考えられる。

(2) 鋼材表面のパターンと亀裂発生との関係性

供試体表面に現れたパターンの谷部と亀裂の位置関係をみることで、鋼材表面のパターンと亀裂発生の関係性について考察する。図7(c)、(f)、(i)、(l)に示すように、いずれの供試体においても、視認可能な低サイクル疲労亀裂（濃紺で示される領域）はほぼパターンの谷部（淡い青で示される領域）に沿って発生していることが観察された。このことから、巨視的亀裂の発生はしわの形成過程と深く関係している可能性が示唆された。

5. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

(1) 微視的表面形状変化を評価した結果、微視的なしわの存在が示唆され、繰返し塑性ひずみを受ける鋼材においても表面しわが発現する可能性が示された。

(2) 巨視的な亀裂は、ほぼしわの谷部に沿って発生していたことが確認され、鋼母材における低サイクル疲労亀裂の発生にしわの発現が影響を及ぼしている可能性が示唆された。

参考文献

- 野村和達：塑性変形時の表面性状変化に着目した鋼材の延性亀裂発生挙動に関する検討，東北大学土木工学専攻，修士論文，2015
- S. Mora et al.: Surface Instability of Soft Solids Under Strain, *Soft Matter*, pp.10612-10619, 2011

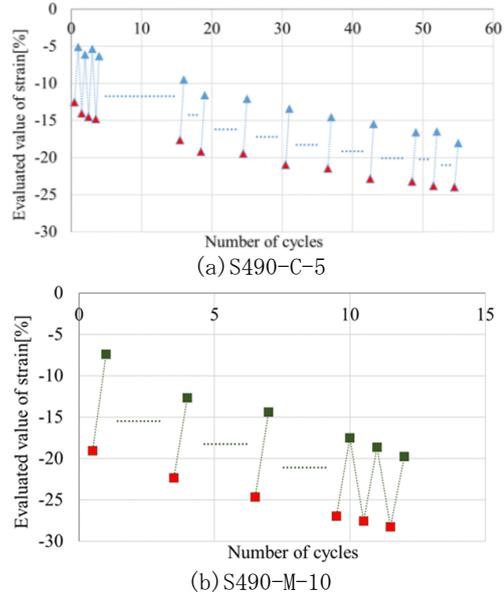


図 6 ひずみ評価値の変化

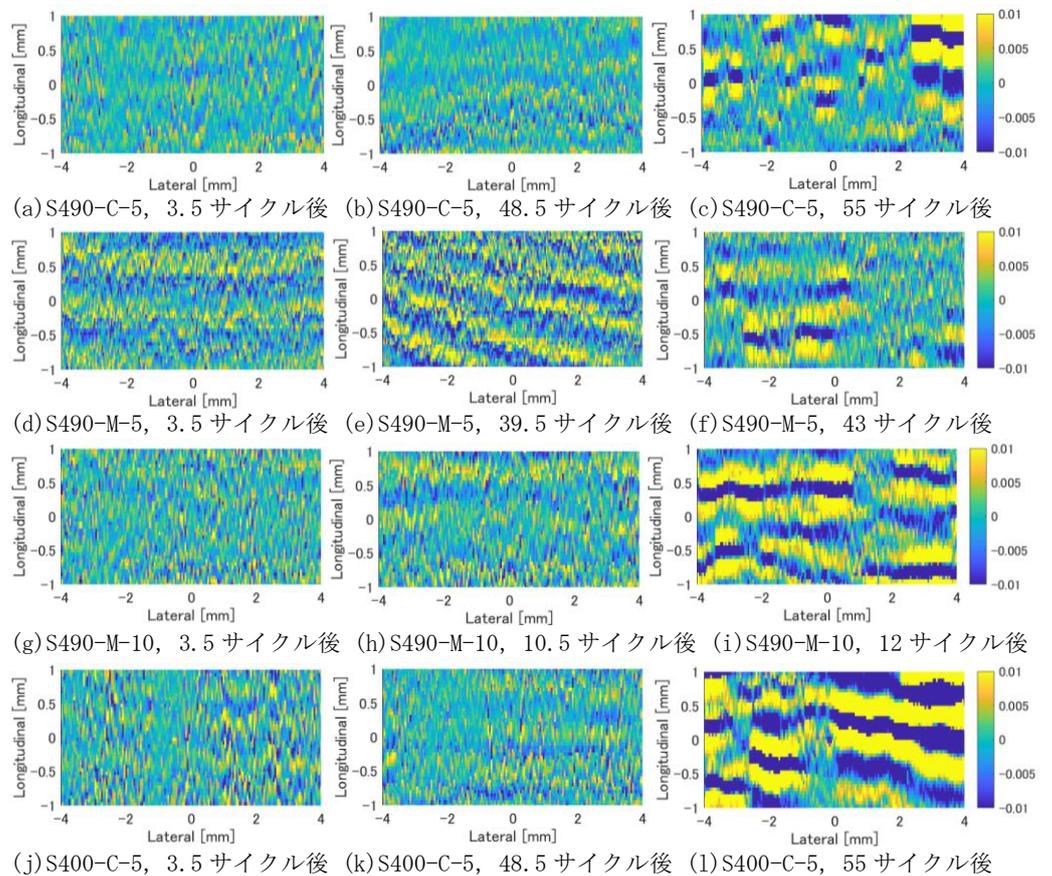


図 7 供試体の微視的表面形状の変化