

1. はじめに

持続的発展可能な社会を構築する動機から、解体される鋼構造建築物から部材を採取して、その部材を新設の鋼構造建築物に再利用する、鋼材リユースへの関心が高まっている。リユースの実現にあたっては、地震力を受けて塑性変形したあと、一定の時間を経て発現する、ひずみ時効を考慮する必要がある。そこで、鋼材の繰返し載荷試験を実施して、ひずみ時効に関する新たなデータを収集したので、ここに報告する。

2. これまでの関連実験

Yang¹⁾は、3種の鋼材 SS400、SN400B、SN490B に対して、同一の製鋼番号の形鋼、H-500×200×10×16 から試験体を切り出して、(1)単調引張試験、(2)繰返し載荷試験、(3)梁の繰返し載荷試験、の3種類を実施する研究計画を立案した。

Yang¹⁾は、(1)について、JIS 1A 号試験片に単調引張で予ひずみを与え、30日または90日の養生期間を経たのち、単調引張を再実施した。この結果から、全室素 (TN) と自由室素 (FN) がより多い SS400 で、ほかの2種より顕著にひずみ時効が発現すること、与えた予ひずみ量が大きいほど、降伏強度が大きくなることを確認した。谷口²⁾と中川³⁾は、(2)と(3)について、前者は JIS 1A 号試験片に、後者は梁試験体に、繰返し載荷で予ひずみを与え、90日の養生期間を経たのち、繰返し載荷を再実施した。中川³⁾は、この結果を累積塑性回転に基づいて考察し、ひずみ時効は梁の降伏耐力を上昇させるが、梁の変形能力に目立った影響を及ぼさないことを示した。

3. 鋼材の繰返し載荷試験

表1に、試験体一覧を示す。ただし、試験体 1-C0 と 2-C0 は、谷口²⁾によって、試験体 1-C2 と 1-C3 は、中川³⁾によって過去に実施されたものである。試験体 2-C2 と 3-C2 は、未実施である。図1に、実験装置を示す。H形鋼のフランジから切り出した JIS 1A 号試験片の試験体に、座屈拘束装置と、評点長の伸びを測定するための伸び計を設置した。伸び計の測定値に基づいて、引張から始めて、工学ひずみを振幅 0.5% から最大で 4.0% まで、2 サイクルずつ繰り返しながら、0.5%

ずつ漸増させた。予ひずみ過程がない一段階載荷と、一段階目で振幅 2% まで載荷したあと、90 日の養生期間をあげた二段階載荷を実施した。二段階載荷は、載荷則の続きから (振幅 2.5% から) 再載荷する場合と、載荷則の最初から (振幅 0.5% から) 再載荷する場合があった。

図2に、SS 400 について、一段階載荷した試験体 1-C0 と、二段階載荷した試験体 1-C3 で得た応力-ひずみ関係を比較する。試験体 1-C3 は、一段階目で振幅 2% まで予ひずみを与え、90 日の養生期間をあげ、二段階目で載荷則の最初から載荷したもので、図2(b)には、二段階目の履歴のみを示す。二段階目の1サイクル目の引張過程では、一段階目で経験した最大応力を超えて弾性応答し、降伏棚を示した。これが、ひずみ時効による機械的特性の変化である。二段階目の載荷履歴は、一段階目と比べて等方硬化の影響が小さくなった。TN や FN の含有量が少ないために、もっともひずみ時効を発現しにくい SN 490B でも、二段階目の1サイクル目の引張では、若干だが降伏棚を示した。

ひずみ時効の大きさを定量化するために、図3に示すように、初期降伏強度 σ_y 、一段階目の載荷で得られた最大応力 σ_1 、二段階目のはじめで得られた降伏強度 σ_2 をとった。本実験では、座屈変形した試験体と座屈高速装置が接触するために、圧縮側のほうが引張側より高い応力を測定する傾向があったが、振幅 2% では、この差がほとんどなかった。応力の比 $(\sigma_1 - \sigma_y) / \sigma_y$ はひずみ硬化、 $(\sigma_2 - \sigma_1) / \sigma_y$ は

表1 試験体一覧

試験体名	鋼材種	載荷則	予ひずみ
1-C0	SS400	一段階	0%
1-C2		二段階、続きから	2%
1-C3		二段階、最初から	2%
2-C0	SN400B	一段階	0%
2-C2		二段階、続きから	2%
2-C3		二段階、最初から	2%
3-C0	SN490B	一段階	0%
3-C2		二段階、続きから	2%
3-C3		二段階、最初から	2%

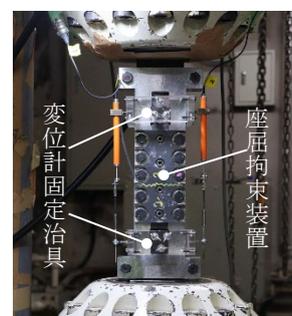


図1 試験体と試験機

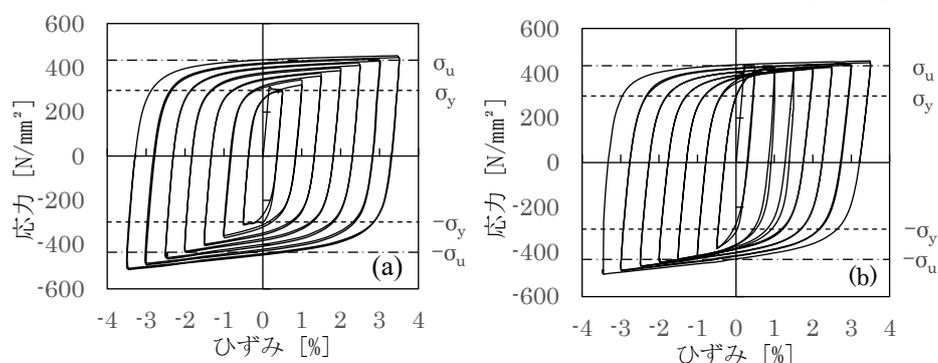


図2 SS400 の応力-ひずみ関係：(a) 一段階載荷；(b) 二段階載荷の二段階目

ひずみ時効による降伏強度の上昇率を表す指標である。図4に、単調引張と繰返し载荷について、両指標を予ひずみ量に関連づけて示す。ひずみ硬化による強度上昇は、単調引張では鋼材種によって違ったが、繰返し载荷では、鋼材種によらず0.5程度だった。振幅2%までの繰返し载荷がもたらしたひずみ硬化は、単調载荷の予ひずみ量に換算すると、SS400で7.9%、SN400Bで7.8%、SS400で9.2%に相当した。ひずみ時効による強度上昇は、単調引張・繰返し载荷いずれでも、SS400で最も大きく、等価な単調引張より繰返し载荷で0.12から0.17大きかった。

4. 载荷履歴のモデル化

ひずみ時効を経験する前後で、材料挙動がどのように変化するかを分析する目的で、実験で得た繰返し応力-ひずみ関係を、汎用解析ソフトOpenSees⁴⁾に組み込まれた材料則Steel02でモデル化した。この基となるGiffre-Menegotto-Pinto則の3係数 σ_0 、 b 、 n のうち、ひずみ硬化係数 b は、Yang¹⁾による単調引張試験に整合するように決定し、固定した。残る2係数は、繰返し载荷に整合させるために調整する必要があり、 σ_0 は、2つの係数 $a1$ と $a2$ を介して、等方硬化則を司り、 n は、3つの係数 R_0 、 $cR1$ 、 $cR2$ を介して、弾性から塑性に遷移する曲線の曲率を規定する。図5に示すように、 $a1$ が大きいほど、等方硬化則の度合いが大きい。また、 R_0 が小さいほど、曲線が緩やかになる。

図6に、鋼材種SS400について、実験から得た応力-ひずみ関係を、較正した履歴モデルと比較する。前述のように、二段階目の载荷は、一段階载荷に比べて等方硬化が小

さく、移動硬化が支配的となる傾向があるが、この違いを、係数 $a1$ を調整することで表現ができた。

5. まとめ

塑性変形とひずみ時効を経た鋼材の性質を把握する目的で、JIS 1A号試験片の繰返し载荷試験を実施して、以下の知見を得た。

- 1) ひずみ時効による降伏強度の上昇率は、単調引張試験の鋼材より、降伏強度上昇率が0.12から0.17大きい。
- 2) ひずみ時効を受けた鋼材は、降伏強度が上昇し、移動硬化は変わらないが、等方硬化が小さくなる傾向がある。この傾向を表現する材料モデルを提示できた。

鋼材種SN400B、SN490Bの二段階目载荷は、一部未実施である。実験を継続し、さらに考察を進める。

参考文献

- 1) Shaoqi Yang, Taichiro Okazaki, Ryota Matsui, Tetsuhiro Asari: Monotonic Tension Tests on Examine Strain-Aging on Structural Steel, Hokkaido Branch Research Report, pp. 107-110, 2019.5
- 2) 谷口佳代、岡崎太郎、松井良太、麻里哲広：ひずみ時効を受けた鋼材 その2 梁の繰返し曲げ载荷試験、日本建築学会学術講演梗概集、構造III、pp.747-748, 2020.7
- 3) 中川春香、岡崎太郎、松井良太、麻里哲広：ひずみ時効を受けた鋼材 その3 繰返し载荷履歴の影響、日本建築学会学術講演梗概集、構造III、pp.673-674, 2021.9
- 4) 3.4.1.2. Steel02 Material-OpenSees Documentation documentation : <https://opensees.berkeley.edu/> (2022年2月4日閲覧)

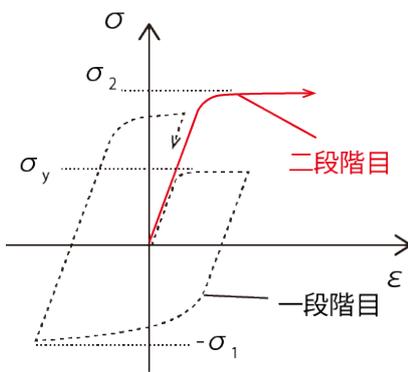


図3 上昇率の定義

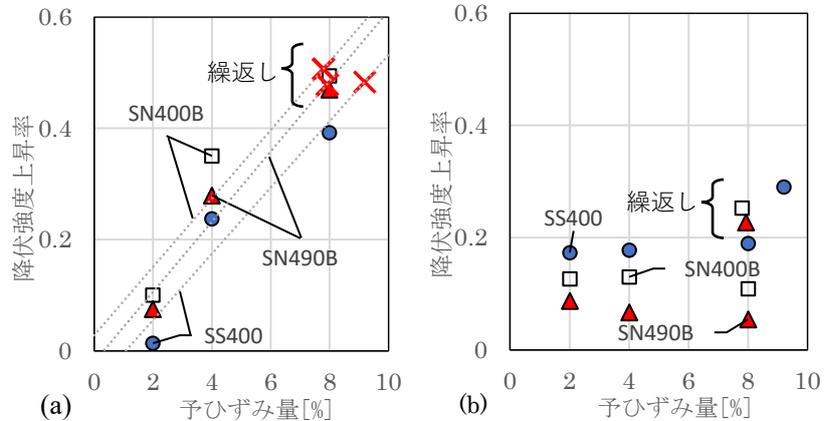


図4 降伏強度の上昇率：(a) ひずみ硬化；(b) ひずみ時効

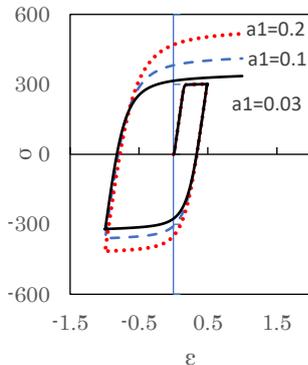


図5 パラメータ a1 と履歴

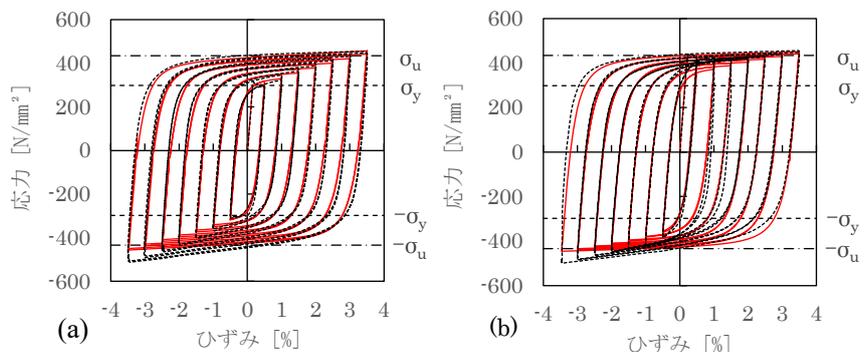


図6 SS400のモデル(実線)と実験結果(点線)の比較：(a) 一段階载荷；(b) 二段階载荷の二段階目、最初から