

# 繰返し塑性変形とひずみ時効を経た建築構造用鋼材の残存耐震性能

中川 春香

## 1. はじめに

建築物が解体される際に、鋼材はスクラップとして回収され、ほぼ完全にリサイクルされるが、リサイクル過程は莫大なエネルギー消費と二酸化炭素排出を伴い、環境負荷が大きい。リサイクルに替わって、鋼材をリユースできれば、持続可能社会の展開に大きく貢献できる。

リユースの実現にあたっては、鋼材の塑性変形のあと、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、Yang<sup>1)</sup>、谷口<sup>2)</sup>は3種の建築構造用鋼材に対し、(1)試験片の単調引張試験、(2)試験片の繰返し載荷試験、(3)梁の繰返し曲げ載荷試験を推進してきた。本論は、(2)と(3)で新たに実施した実験を報告する。

## 2. 既往の研究

ひずみ時効とは、塑性変形を受けて、一定期間を経た金属の機械的性質が、当初と変わったものになる現象である。一般に、1) 降伏棚の再出現、2) 降伏強度及び引張強度の上昇、3) 靱性の低下、がみられる。

Yang<sup>1)</sup>は、SS400、SN400B、SN490BのJIS 1A号試験片について、30日または90日の養生期間において二段階で単調引張試験を実施し、全室素(TN)と自由室素(FN)がより多いSS400で、他の2種より顕著にひずみ時効が発現することを確認した。

## 3. JIS 1A号試験片の繰返し載荷試験

表1に、試験体一覧を示す。試験片はYang<sup>1)</sup>と同一のSS400鋼材、H-500×200×10×16のフランジから切り出した。工学ひずみで制御し、引張からはじめて、振幅0.5%から2サイクル毎に0.5%ずつ漸増する繰返し履歴を与えた。予ひずみ過程がない一段階載荷と、90日の養生期間をあげた二段階載荷を実施した。後者には、次の振幅から継続するAパターンと、最初から再開するBパターンがあった。

図1に、振幅2%

まで予ひずみを与えた後の、二段階目の載荷で得た応力-ひずみ関係を示す。試験体が座屈変形したために、振幅3.0%または3.5%で試験を終了した。はじめの引張過程で、降伏棚が再出現し、予ひずみが大きいほど、降伏強度が高くなっていた。

図2に、累積塑性ひずみと、各振幅の正・負最大応力の関係を示す。累積塑性ひずみ $C_p^N$ は、下式で定義される。

$$C_p^N = \sum_{i=1}^N |\epsilon_p^i| \quad (1)$$

ここに、 $N$ はサイクル数、 $\epsilon_p^i$ は第 $i$ サイクルの塑性ひずみ増分である。ひずみ時効の影響がなくなり、予ひずみが無い試験体1-Cと同じ履歴に回帰するまでに必要な累積塑性ひずみは、BパターンよりもAパターンで大きく、予ひずみ量が大きいほど大きい傾向があった。

表1 試験体一覧

試験体名	載荷則	予ひずみ[%]
1-C	一段階繰返し	0
1-CA1	二段階繰返し A	1
1-CA2		2
1-CB1	二段階繰返し B	1
1-CB2		2

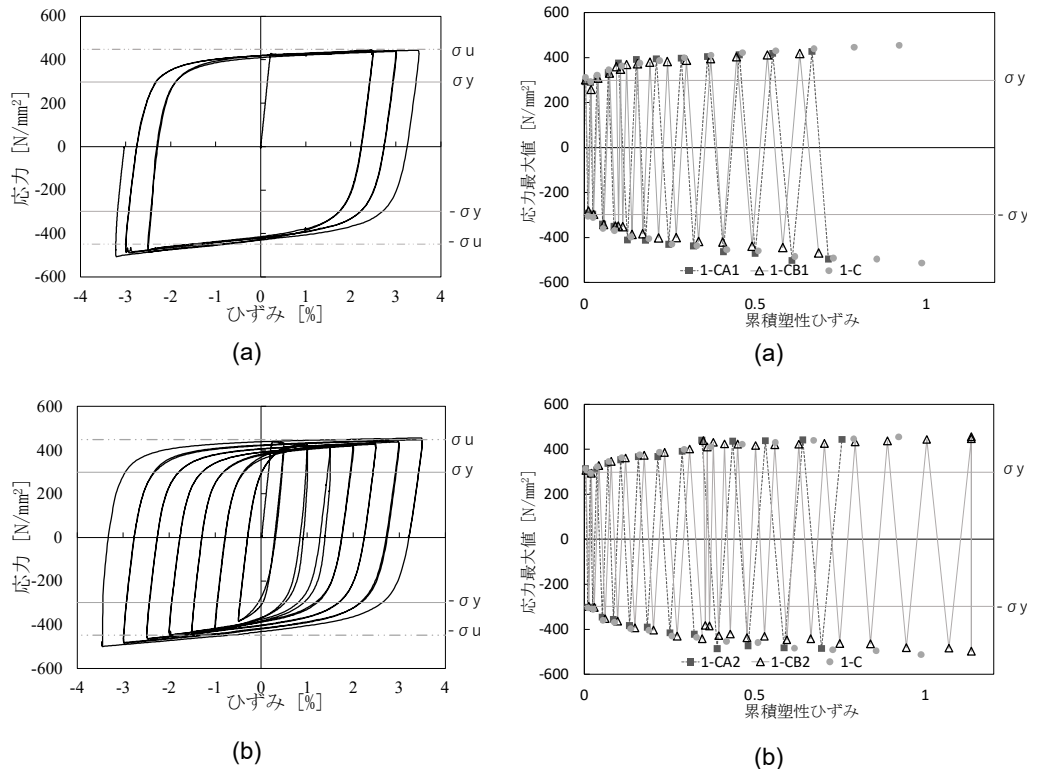


図1 予ひずみ2%とひずみ時効を経たあとの応力-ひずみ関係 : (a) Aパターン、(b) Bパターン  
図2 応力最大値-累積塑性ひずみ関係 : (a)予ひずみ1%、(b)予ひずみ2%

#### 4. 梁の繰返し曲げ実験

柱梁接合部を模したト字形部分架構の構成で、梁の繰返し曲げ試験を実施した。梁断面は、H-500×200×10×16、鋼材種は Yang<sup>1)</sup>と同一の SS400、SN400B、SN490B であった。試験体一覧を表 2 に示す。米国規準が、柱梁接合部の検証のために規定する荷重履歴に基づいて、層変形角で制御した。振幅 0.02 rad までの予ひずみ過程のあと、90 日の養生期間をあけ、荷重履歴を最初から再開する B パターンの二段階荷重を実施した。ただし、後段では、谷口<sup>2)</sup>が実施した、過程がない一段階荷重と、A パターンの二段階荷重の結果を合わせて議論する。

図 3 に、二段階目の荷重で得た履歴を、梁端モーメントと層変形角の関係で示す。いずれの試験体も、材料試験に基づく全塑性モーメント  $M_p$  を超えて弾性挙動を示し、振幅 0.15 rad で降伏しはじめた。ただ、振幅 0.05 rad の 2 サイクルを終了するまで、 $M_p$  以上の耐力を保持した。

図 4 に、累積塑性回転角（定義は式(1)と同様）と、各振幅の最大モーメントの関係を、一段階荷重の場合と比較する。鋼材種 SS400 では、二段階荷重の開始から、累積塑性回転角が 0.038 rad を超えるまで、一段階荷重の場合よりモーメントが大きかった。しかし、鋼材種 SS400B と SS490B では、二段階荷重の開始から実験終了まで、一段階荷重の場合よりもモーメントが低いままであった。

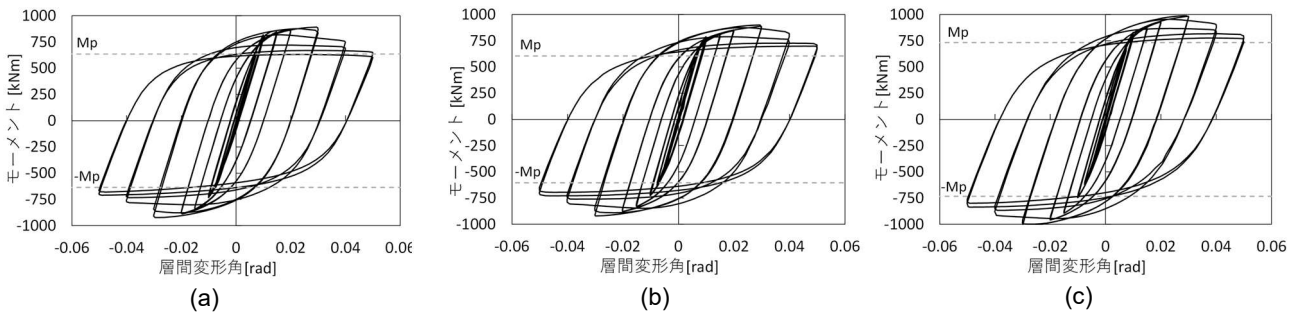


図 3 モーメント-層間変形角関係 : (a) B1-CB2、(b) B2-CB2、(c) B3-CB2

表 2 試験体一覧

試験体名	鋼材種	荷重パターン	予ひずみ量[rad]
B1-C	SS400	-	0
B1-CB2		B	0.02
B2-C	SN400B	-	0
B2-CB2		B	0.02
B3-C	SN490B	-	0
B3-CB2		B	0.02

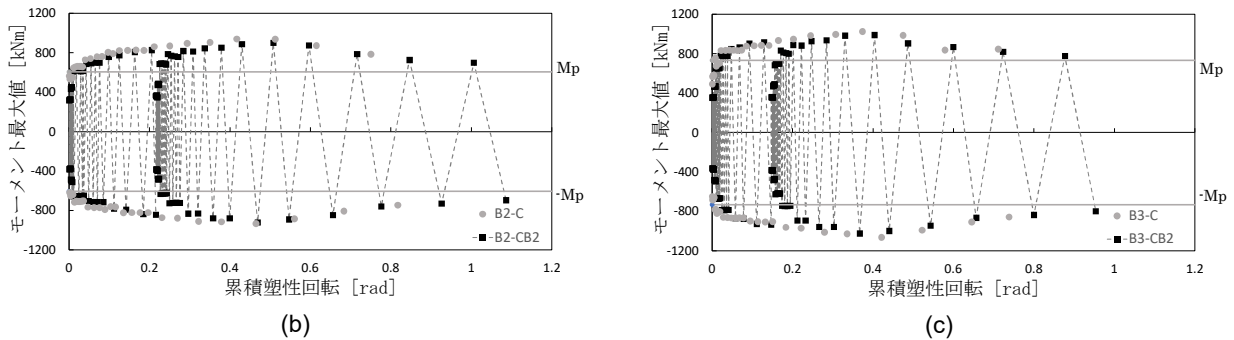


図 4 累積塑性回転と最大モーメント : (a) B1-C と B1-CB2、(b) B2-C と B2-CB2、(c) B3-C と B3-CB2

#### 5. まとめ

繰返し塑性変形とひずみ時効を経た鋼材のリユース性を把握するために、一連の実験を実施している。JIS 1A 号試験片の繰返し荷重試験から、以下の知見を得た。

- 予ひずみが大きいほど、ひずみ時効を経たあとの降伏強度が高くなる。
- 二種類の繰返し荷重のうち、次の振幅から継続するパターンの方が、最初から再開するパターンよりも、ひずみ時効の影響がなくなるまでに要する累積塑性ひずみが大きかった。

梁の繰返し曲げ実験から、以下の知見を得た。

- 累積塑性回転角の観点からみると、鋼材種別に関わらず、ひずみ時効は、梁の繰返し荷重挙動に目立った影響を及ぼさなかった。

鋼材種 SS400B と SS490B は、試験片の繰返し荷重試験を未実施である。実験を継続し、さらに考察を進める。

参考文献

- 1) Shaoqi Yang: Residual Performance of Structural Steel after Plastic Deformation and Strain Aging, Master's thesis Graduate School of Engineering Hokkaido University, September 2019
- 2) 谷口佳代:繰返し塑性変形とひずみ時効を経た鋼梁の残存耐震性能 北海道大学工学部学士論文 2020.3