

# 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とリユース性

Residual Performance and Reusability of Steel Beams after Cyclic Plastic Deformation and Strain Aging

建築都市空間デザイン専攻 空間防災講座 建築構造工学研究室 中川春香

## Abstract

Towards the goal of establishing steel reuse, the residual performance of steel after plastic deformation and strain aging was examined through three test series: tension coupon tests; cyclic coupon tests; and cyclic-loading beam tests. The extent of strain aging was more prominent in steel with higher free nitrogen content. The coupon tests suggested that strain aging does not depend on the amount of pre-strain, and that strain aging tends to diminish isotropic hardening under cyclic loading. The beam tests exhibited increased elastic limit after pre-loading to  $\pm 0.02$  rad but little change in maximum strength and plastic deformation capacity. Residual deformation of the beam was within geometric tolerances after loading to  $\pm 0.01$  rad, but exceeded some tolerance items after loading to  $\pm 0.02$  rad.

**Keywords:** steel structures, seismic performance, reuse, mechanical properties, strain aging, residual deformation

## 1. はじめに

部材リユースは、建築鋼構造の分野で持続可能な開発に貢献する有力な方法として、世界的に関心を集めている。しかし、わが国では、高い確率で、建築構造物が共用期間中に大小の地震を経験しているという難しさがある。地震で繰返し塑性変形を受けた鋼材は、時間を経ると、降伏強度と引張強度が上昇し、塑性変形能力が低下する現象、所謂ひずみ時効を来す。鋼材のひずみ時効に関しては、冷間成形鋼管の製造過程<sup>1), 2)</sup>、地震を経験した建築構造物の継続利用<sup>3), 4)</sup>の観点からの検証例がある。こうした研究から、ひずみ時効が、予ひずみ量と養生期間に依存すること、C (炭素) や N (窒素)、特に FN (自由窒素) 含有量が多いほど顕著であること、などが分かっている。山田<sup>4)</sup>らは、ひずみ時効が、90 日でほぼ安定することを示した。本研究は、地震を受けてひずみ効果とひずみ時効を経た鋼部材の残存耐震性能と、そのリユース性の判定方法を検証するために、一連の実験を実施した。

## 2. 実験計画

表 1 に、(I) JIS 1A 号試験片の単調引張試験、(II) JIS 1A 号試験片の繰返し載荷試験、(III) 梁の繰返し載荷試験、の 3 つの試験で構成された実験計画を示す。試験(I)は、Yang<sup>5)</sup>が実施したものだが、実験を包括的に議論するために、本論で述べる。

試験体は、SS400、SN400B、SN490B の高炉材による H-500×200×10×16 から製作した。表 2 に、関連元素の含有量を示す。FN 含有量は、SS400 で 0.006 wt%、SN400B と SN490B で 0.002 と 0.003 wt%、と SS400 が他の 2 つの鋼材より目立って大きかった。ここで測定した FN の多寡が、それぞれの鋼材種の一般的な傾向である保証はない。JIS 1A 号試験片を、H-500×200×10×16 のフランジ外縁とウェブ中央近くから採取した。図 1 に示すように、試験(III)では、H 形鋼をエンドプレートに溶接した梁試験体を、片持梁の条件で繰返し載荷した。梁端と載荷梁近くで、両フランジの構面外移動を拘束した。

それぞれの試験で、一段階目で所定の予ひずみ量を与え、養生期間を経たのち二段階目の載荷を行った。養生期間は、ひずみ時効が安定すると考えられる<sup>4)</sup> 90 日間としたが、試験(I)は、30 日間でも実施した。一段階目で与える予ひずみ量を、試験(I)では 0、2、4 または 8%、試験(II)では 0、 $\pm 1$  または  $\pm 2$ %、試験 (III) では 0、 $\pm 0.01$  または  $\pm 0.02$  rad とした。

表 1 実験計画

実験項目	養生期間	予ひずみ量		
		SS400	SN400B	SN490B
(I)	30 日 90 日	0, 2, 4, 8 [%]	0, 2, 4, 8 [%]	0, 2, 4, 8 [%]
(II)	90 日	0, $\pm 1$ (R), $\pm 2$ (R), $\pm 1$ (S), $\pm 2$ (S) [%]	0, $\pm 1$ (R), $\pm 2$ (R), $\pm 1$ (S), $\pm 2$ (S) [%]	0, $\pm 1$ (R), $\pm 2$ (R), $\pm 1$ (S), $\pm 2$ (S) [%]
(III)	90 日	0, $\pm 0.01$ (R), $\pm 0.02$ (R), $\pm 0.02$ (S) [rad]	0, $\pm 0.01$ (R), $\pm 0.02$ (R), $\pm 0.02$ (S) [rad]	0, $\pm 0.01$ (R), $\pm 0.02$ (R), $\pm 0.02$ (S) [rad]

註：(R) は続きから再載荷、(S) は最初から再載荷

繰返し载荷則について、試験(II)では、引張側を正にとり、 $\pm 0.5\%$ から始めて、 $\pm 0.5\%$ ずつ漸増し、それぞれの振幅を2回ずつ繰り返した。試験(III)では、米国 AISC の耐震規定に基づいて载荷した。試験(II)も(III)も、一段階目終了時に変形量を0に戻し、二段階目では、同じ载荷履歴を、続きから再開する R (Resume) または最初から再開する S (Start over) を実施した。

試験(III)では、試験前と一段階目終了後に、200枚前後の写真と画像処理ソフトウェアを用いて、各試験体の三次元モデルを作成し、実測値と照合しながら形状不整を測定した。

### 3. 材料試験結果

図2と3に、試験(I)と(II)から得た応力とひずみの関係を、それぞれ示す。使用鋼材は SS400 と SN490B のフランジで、養生期間は90日間であった。図3は、予ひずみ $\pm 2\%$ のあと、続きから再開した(R)結果で、点線は一段階目の応答を、実線は二段階目の応答を示し、二段階目の第一サイクルを太線で強調する。単調・繰返し载荷のいずれでも、二段階目で降伏棚が再出現し、一段階目より降伏強度が高かった。予ひずみ量が多いほど、降伏強度の上昇幅が大きかった。繰返し载荷試験では、二段階目の履歴で等方硬化の成分が減少し、

移動硬化の成分がより支配的になる特徴を確認した。こうした傾向は、SS400 で顕著だったが、SN400B と SN490B で微小だったことから、ひずみ時効が、FN含有量と相関することを確認した。

表2 鋼材の化学成分

	SS400	SN400B	SN490B
C [wt%]	0.15	0.16	0.16
TN [wt%]	0.0073	0.0031	0.0028
FN [wt%]	0.006	0.003	0.002

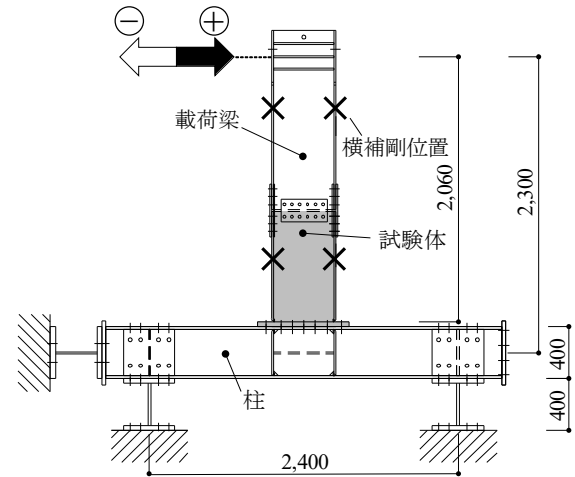


図1 梁実験 試験体と試験装置 [寸法: mm]

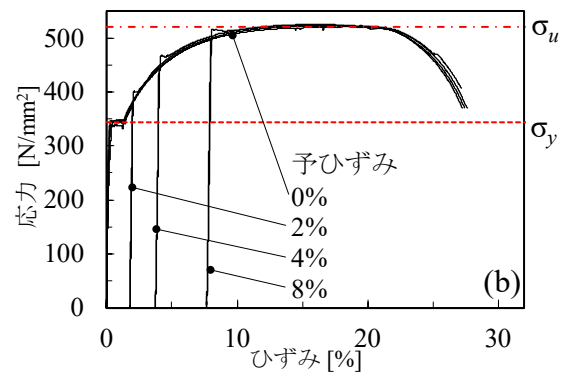
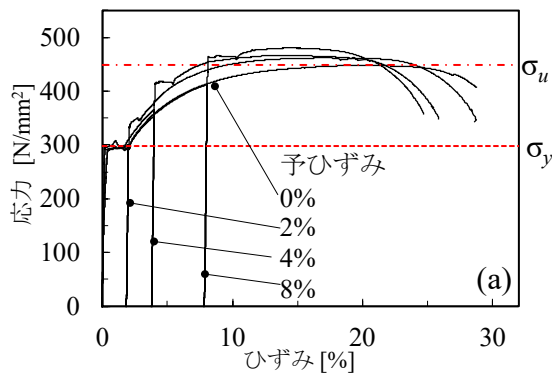


図2 JIS 1A 号試験片の単調引張試験の結果: (a) SS400, (b) SN490B

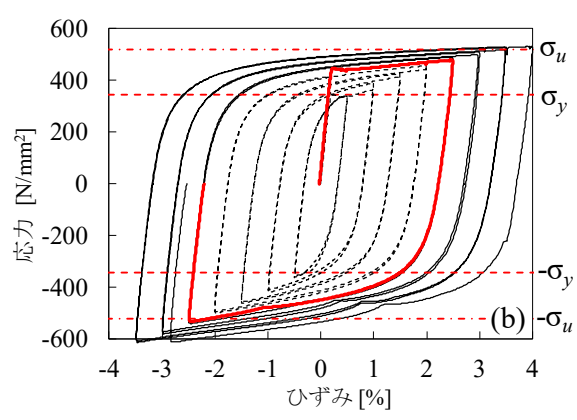
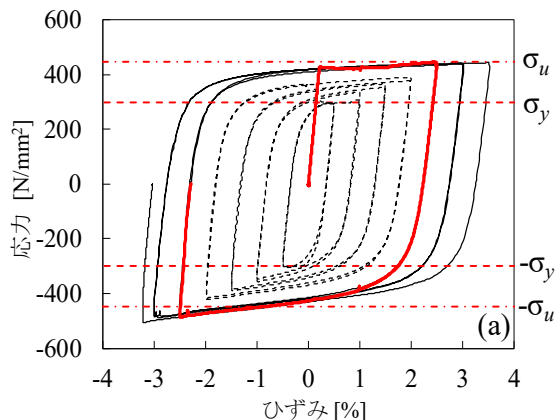


図3 JIS 1A 号試験片の繰返し载荷試験 (予ひずみ $\pm 2\%$ (R)) の結果: (a) SS400; (b) SN490B

#### 4. 梁の繰返し載荷試験

図4に、梁の繰返し載荷試験から得た、梁端モーメントと層変形角の関係を示す。SS400とSN490Bについて、予ひずみ $\pm 0.02$  radのあと続きから再開した(R)結果を示す。点線は一段階目の応答を、実線は二段階目の応答を示し、二段階目のはじめの引張過程を太線で強調する。二段階目のはじめに、当初より高い弾性限耐力を示した。予ひずみの有無による履歴の違いは、続きから再載荷した場合(R)は、1サイクルでなくなり、最初から再載荷した場合(S)も、数サイクルを経るとほぼなくなった。ほぼ例外なく、 $\pm 0.04$  rad前後で溶接始末端に亀裂を生じたが、そのうち振幅の増大とともに、フランジとウェブの局部座屈変形が進行すると耐力が低下し、亀裂は目立って進展しなかった。最終サイクルに注目すると、予ひずみ過程に関わらず、どの試験体も $M_p$ 以上の耐力を保ち、予ひずみなしの試験体とほぼ同じ履歴を示した。

表3に、JIS G 3192とASTMA6が規定する、H形鋼の寸法不整の確認項目と許容値と、試験前または養生中に測定した形状不整を示す。許容値を超えた計測値を、太字で強調する。振幅 $\pm 0.01$  radまで経験した梁の不整は、許容値以下だったが、振幅 $\pm 0.02$  radまで経験した梁は、一部の項目で許容値を超えた。つまり、部材変形角が0に近い場合でも、形状不整に基づいて、梁が経験した層変形角が $\pm 0.02$  radを超えていないことを安全側に判定できる。この結果は、リユース材が新材と遜色ない耐震性能を保有するかどうかを、形状不正に

基づいて判定できる可能性を示す。

#### 5. 考察

ひずみ時効の大きさを定量化する目的で、図6に示すように、予ひずみ0の単調引張試験から定めた初期降伏強度 $\sigma_y$ 、一段階目の最後の除荷開始点の応力 $\sigma_1$ 、二段階目の1サイクル目の引張過程で得た降伏強度 $\sigma_2$ に注目して、降伏強度の上昇率を、ひずみ硬化による上昇率 $(\sigma_1 - \sigma_y)/\sigma_y$ と、ひずみ時効による上昇率 $(\sigma_2 - \sigma_1)/\sigma_y$ に分解した。図7に、試験(I)を分解した結果を黒で示す。ひずみ硬化による上昇率は、予ひずみ量にほぼ比例したが、ひずみ時効による上昇率は、予ひずみ量によらずほぼ一定であった。FN含有量が多いほど、ひずみ時効による強度上昇が大きい傾向を確認できた。予ひずみが4%を超えると、ひずみ硬化による上昇率が、ひずみ時効による上昇率を上まわった。ここでは示さないが、試験(II)の繰返し載荷試験を、等価な単調載荷に置換すると、試験(I)とほぼ同じ傾向を示した。

図7に、類似の試験<sup>1,3,6</sup>から抽出した結果を灰色で示す。文献1)は高強度のパイプライン鋼管を、文献2)と6)は構造用鋼材、文献3)は鉄筋を対象とした。文献3)と6)からは、ひずみ時効がほぼ安定したと思われる、養生期間が50日間以上の結果のみを抽出した。文献1)と2)は、養生を100°Cから250°Cの高温かつ30分から10時間の短期間で実施した結果である。予ひずみが2%未満で、第一段階でのひずみ硬化がごく小さい場合には、ひずみ時効による上昇率も小さかった。N含有量が0.0005 wt%未満と極端に小さい鋼材<sup>2)</sup>では、他の鋼材と違って、ひずみ時効による上昇率が、予ひずみ量に比例したが、この理由は分析できていない。

試験(I)と(II)から、JIS規格が規定する、機械的特性の制限内

表3 一段階後の梁の形状不整

確認項目	許容差 [mm]		鋼材種と予ひずみ量別の変形 [mm]						
	規格		SS400		SN400B		SN490B		
	JIS G 3192	ASTM A6	未載荷	0.01 rad	0.02 rad	0.01 rad	0.02 rad	0.01 rad	0.02 rad
y軸方向のむくり, C	2.1	2.2	1.6	2.0	<b>2.8</b>	1.8	<b>2.4</b>	0.8	0.7
x軸方向のむくり, S	2.1	2.2	1.5	2.0	<b>3.6</b>	<b>2.2</b>	<b>3.9</b>	0.6	<b>2.6</b>
ウェブ反り, W	2.5	N.A.	0.6	1.6	<b>3.6</b>	1.2	0.5	0.6	0.3
直角からのずれ, T1	2.4	N.A.	0.1	1.9	<b>2.6</b>	2.2	1.8	1.3	1.3

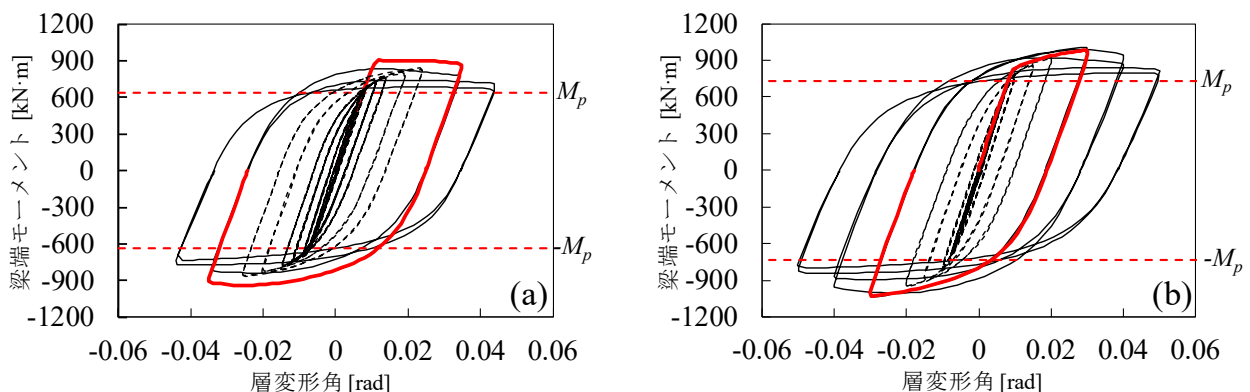


図4 梁の繰返し載荷試験（予ひずみ $\pm 0.02$  rad(R)）の結果：(a) SS400；(b) SN490B

にとどまるために許容できる予ひずみ量を判断すると、SS400は8%以下、SN400BとSN490Bは、降伏強度が上限値にかかるために、2%以下、4%以下であった。試験(III)で測定した梁のひずみ分布をみると、例えば、予ひずみ $\pm 0.02$  rad を経たSN400Bで、JIS規格を超えたフランジの領域は、梁端から250 mmまで(梁せい500 mmの半分)であった。

実験結果を統合すると、H-500 $\times$ 200 $\times$ 10 $\times$ 16による、スパン・せい比2100 $\times$ 2 $\div$ 500=8.4の梁は、層変形角 $\pm 0.02$  radを経ると、梁端近傍にJISの材料規格を満足しない領域を含み、地震前より弾性限耐力が上昇しているが、地震前と遜色ない残留変形性能を保持する。この範囲までであれば、地震を受けた梁を、新材同等材としてリユースする判断が成り立つ。変形が、層変形角 $\pm 0.02$  radを超えているかどうかは、形状不正に基づいて、安全側に判断できる。

なお、試験(III)は、一定の部材寸法に対して行ったが、実験結果の適応範囲を把握するために、検証範囲を、断面形状や部材長が違った場合に広げる必要がある。部材寸法によっては、より早期に局部座屈変形が進行する場合や、逆に、溶接始端の亀裂が支配的になる場合が考えられる。

## 6. 結論

建築鋼構造の部材リユースを確立する目的で、大小の地震による、塑性変形とひずみ時効を経た鋼材の残留耐震性能を検証する一連の実験を実施し、以下の知見を得た。

- ・ 繰返し塑性载荷とひずみ時効を受けた鋼材は、等方硬化の成分が当初より減少した。
- ・ 降伏強度の上昇率を、ひずみ硬化とひずみ時効の寄与に分解した結果、ひずみ硬化の寄与は予ひずみ量に比例したが、ひずみ時効の寄与は予ひずみ量によらず、ほぼ一定であった。
- ・ 塑性変形を経た鋼材がJIS規格を満足する限界は、単調载荷で予ひずみ2%程度であった。
- ・ 振幅 $\pm 0.02$  radまでの塑性载荷履歴を受けた梁は、弾性限耐力が上昇したが、塑性载荷を1、2サイクル経ると、予ひずみがない梁と応答の違いがなくなり、振幅 $\pm 0.04$  radの大振幅での応答はほぼ同じだった。つまり、振幅 $\pm 0.02$  radまでの予ひずみは、梁の塑性変形能力に影響を及ぼさなかった。
- ・ 形状不整に基づいて、梁が経験した繰返し層変形角が $\pm 0.02$  radを超えたかどうかを安全側に判定できる可能性があり、これは、鋼材のリユース可否の判断材料になり得る。

鋼材の部材リユースを実現するためには、電炉材を含めて、FN含有量も部材寸法も異なるサンプルにつ

いて、検証を深める必要がある。

## 参考文献

- [1] Zhao W: Static strain aging behavior of an X100 pipeline steel, Materials Science and Engineering A 550, pp. 418-422, 2012.4
- [2] Kaufmann E: Characterization of cyclic inelastic strain behavior on properties of A572 Gr. 50 and A913 Gr. 50 rolled sections, AISC, ATLSS Report No. 01-13, 2001.12
- [3] Momtahan A, Effects of strain-aging on New Zealand reinforcing steel bars, Bulletin of the New Zealand society for earthquake engineering, Vol. 42, No. 2, pp. 179-186, 2009.9
- [4] 山田哲ほか: ひずみ時効を受けた鋼材の履歴性状、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 927-930, 2006.9
- [5] Yang S: Residual performance of structural steel after plastic deformation and strain aging, Master's thesis, Graduate School of Engineering Hokkaido University, 2019.9
- [6] Yang Y: Mechanical behaviors and constitutive model of structural steel influenced by strain aging, Journal of Constructional Steel Research 192, 107211, 2022.5

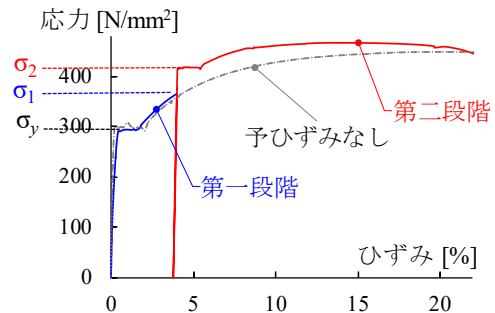


図6 降伏強度上昇率の分解

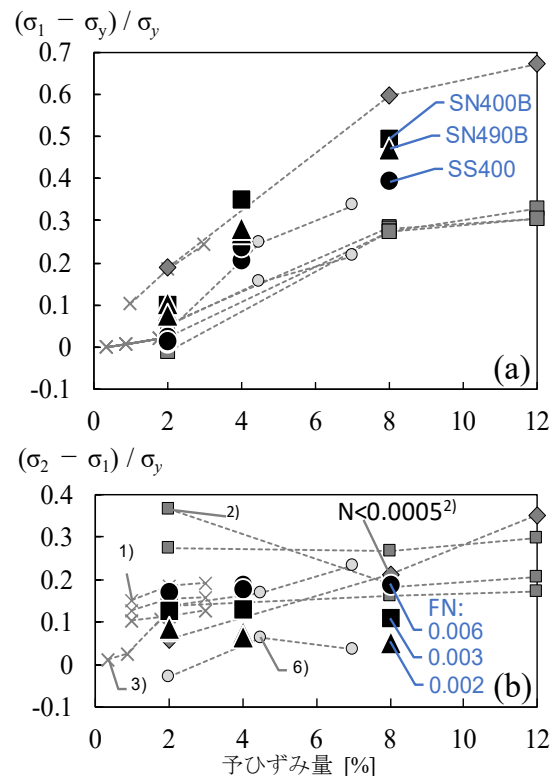


図7 降伏強度上昇率と予ひずみ量の関係：  
(a) ひずみ硬化の寄与；(b) ひずみ時効の寄与