

鋼部材リユース判定技術の確立に向けた材料試験と地震後残留変形の検討

Post-earthquake Residual Properties and Deformation of Steel Components to Inform Reuse Judgement

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 新井文佳

Abstract

Towards the larger goal to realize steel reuse, two studies were conducted: material tests to quantify change in mechanical properties attributed to strain hardening and strain aging; and numerical simulation to quantify residual deformation of steel beams after cyclic plastic deformation. The increase in yield strength attributed to strain aging was independent of the amount of pre-strain but increased with the number of times pre-strain was introduced. An SS400 sample with 0.006 wt% free nitrogen exhibited significantly smaller elongation after four pre-strains rather than one or none. The finite element method was used to reproduce the residual deformation at the beam end after cyclic plastic loading. The validated FEM modeling scheme was used to conduct parametric analyses over a range of cross sections and lengths to correlate residual deformation with experienced story drift ratios.

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

1. はじめに

鋼材は優れた循環資源であるが、そのリサイクル過程は、莫大な消費エネルギーと二酸化炭素量排出を伴う。鋼部材のリユースを推進できれば、建築鋼構造の環境性をさらに高めることができる。

しかし、わが国では、高い確率で、建築構造物が供用期間中に地震を経験することによる難しさがある。地震で大小の繰返し塑性変形によるひずみ硬化を生じた鋼材は、時間を経ると、さらに降伏強度と引張強度が上昇し、塑性変形能力が低下する、ひずみ時効を生じる。冷間成形鋼管の角部特性^{1),2)}、地震を経験した建築構造物の継続利用^{3),4)}に注目した研究から、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 TN (全窒素)、特に FN (自由窒素) 含有量が多いほど顕著であることが分かっている。Shegay⁵⁾は、V (バナジウム) がひずみ時効を抑制する効果を指摘した。山田⁶⁾らは、ひずみ時効が、30日から90日でほぼ安定することを見出した。

以上の背景を踏まえて、鋼材リユースの判定技術を確立するために、ひずみ硬化とひずみ時効が鋼材の機械的特性に与える影響を定量化する材料試験と、塑性変形を受けた鋼梁の残留変形を検証する数値解析を実施したので、以下の章で詳らかにする。

2. 実験計画

ひずみ時効を定量的に把握する目的で、表1に示す単調引張試験を実施した。先にYang⁶⁾が実施した試験も含めている。JIS 1A号試験片を、SS400、SN400B、SN490B高炉材のH-500×200×10×16のフランジ外縁とウェブ中央から採取した。表2に、関連元素の含有量を示す。FN含

有量は、SS400で0.006wt%、SN400BとSN490Bで0.002と0.003wt%、とSS400が他の2つの鋼材より目立って多かった。V含有量は、いずれも僅かだったが、SN490Bが若干多かった。

載荷回数1とは、一回の載荷で破断まで完了する通常の引張試験、載荷回数2とは、1段階目で所定の予ひずみ量を与え、養生期間を経たのち再び載荷を行う2段階試験、載荷回数3や5とは、予ひずみと養生を複数回で与える3段階、5段階試験である。3段階試験は、予ひずみ量を2%ずつ与えるものと、4%ずつ与えるものがあった。予ひずみ後に、ひずみ時効が安定すると考えられる90日⁴⁾だけ養生したが、2段階載荷の一部で、30日養生も実施した。各段階で与える予ひずみ量を、0(予ひずみなし)、2、4または8%とした。本報ではフランジから採取し、予ひずみ後の養生期間を90日とした試験体のみを示す。

表1 JIS 1A号試験片実験計画

載荷回数	養生日数	総予ひずみ量 [%]			実施者
		SS400	SN400B	SN490B	
1	-	0	0	0	Yang ⁶⁾
2	30, 90	2, 4, 8	2, 4, 8	2, 4, 8	Yang ⁶⁾ , 本報
3	180	4, 8	-	4, 8	本報
5	360	8	-	8	本報

註:3、5段階載荷の各載荷段階の間の養生期間は90日

表2 鋼材の関連元素の含有量

	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
V [wt%]	0.001	0.000	0.002

3. 実験結果

図1に、SS400とSN490Bの2段階载荷で得た応力とひずみの関係を示す。いずれの鋼材でも、2段階目で降伏棚が再出現した。予ひずみ量が大きいほど、降伏強度が大きく上昇し、伸びが減少する傾向は、SS400で顕著だったが、SN490Bでは見られず、ひずみ時効がFN含有量と相関した。SN400BとSN490Bでは、FN含有量の違いはわずかだったが、Vの含有量が多いSN490Bの方が、若干だがひずみ時効が小さかった。Shegav⁹⁾らが指摘する通り、Vがひずみ時効を抑制した可能性がある。

図2に、予ひずみ2%を4回に分けて与えた5段階载荷を、予ひずみ8%を一回で与えた2段階载荷と、予ひずみなしの応答と対比する。予ひずみ8%を累積で与えても一回与えても、そのあとで同じ降伏強度を示した。SN490Bは、2段階・5段階载荷、予ひずみなしで降伏強度も伸びもほとんど変わらなかったが、SS400は、5段階载荷で2段階载荷より顕著に伸びが減少した。したがって、ひずみ時効を顕著に生じる鋼材では、その伸びの減少が予ひずみ量だけではなく、予ひずみを与えた回数の影響も受ける可能性がある。

図3に示すように、降伏強度の上昇率を、ひずみ硬化による上昇率 $\Delta\sigma_H/\sigma_y$ と、ひずみ時効による上昇率 $\Delta\sigma_A/\sigma_y$ に分解した。図4に、 $\Delta\sigma_H/\sigma_y$ 、 $\Delta\sigma_A/\sigma_y$ と予ひずみ量の関係を示す。2段階試験を黒マーカーで、3と5段階試験を点線でつないだ白マーカーで示している。2段階载荷では、 $\Delta\sigma_A/\sigma_y$ が予ひずみ量によらず一定で、FN含有量が多いほど大きく、

$\Delta\sigma_H/\sigma_y$ が予ひずみ量にほぼ比例した。3と5段階载荷では、予ひずみを与えるたびに $\Delta\sigma_A/\sigma_y$ が増加し、その分だけ、 $\Delta\sigma_H/\sigma_y$ が2段階载荷の場合より減少した。 $\Delta\sigma_H/\sigma_y$ の増加量は、FN含有量が少ないSN490Bで小さく、FN含有量が多いSS400で大きかった。

したがって、予ひずみと養生過程を多数経るほど、降伏強度の上昇に対するひずみ時効の寄与が大きく、これが図2(a)の5段階試験にみられた大幅な伸びの減少を起こしたと考えられる。窒素含有量の多寡の判定基準として、角形鋼管に規定される上限値TN 0.006 wt%が参考になる。本研究で検証したサンプルは3つに過ぎないが、顕著なひずみ時効を示したSS400のTNは上限値を超え、ひずみ時効が目立たなかったSN400BとSN490BのTNは、上限値の半分であった。

4. 梁の繰返し载荷試験の有限要素法解析

中川⁷⁾は、同じH-500×200×10×16を用いた、スパン・せい比8.4の梁の繰返し载荷実験を実施して、当初と遜色ない塑性変形能力を保持する限界が、塑性変形角±0.02 radであると報告した。また、その塑性変形角±0.02 radを経験したかどうかを、材料試験を実施せずとも、残留変形が形状不整の許容を超えたら、層間変形角±0.02 radを経験したと判定できると報告した。この判定法の一般性と適用範囲を把握するために、断面形状や部材長が違った場合を数値解析で検証した。

有限要素法解析ソフトADINA ver. 23.00⁸⁾を用いて、中川⁷⁾の梁試験を、変形モードと変形量に注目して再現した。図5に試験体と実験装置を図6(a)に

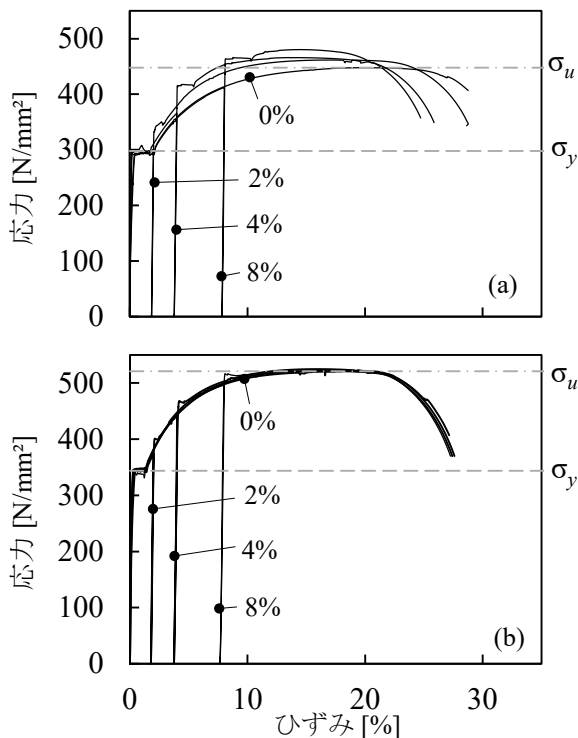


図1 2段階载荷の結果：(a) SS400；(b) SN490B

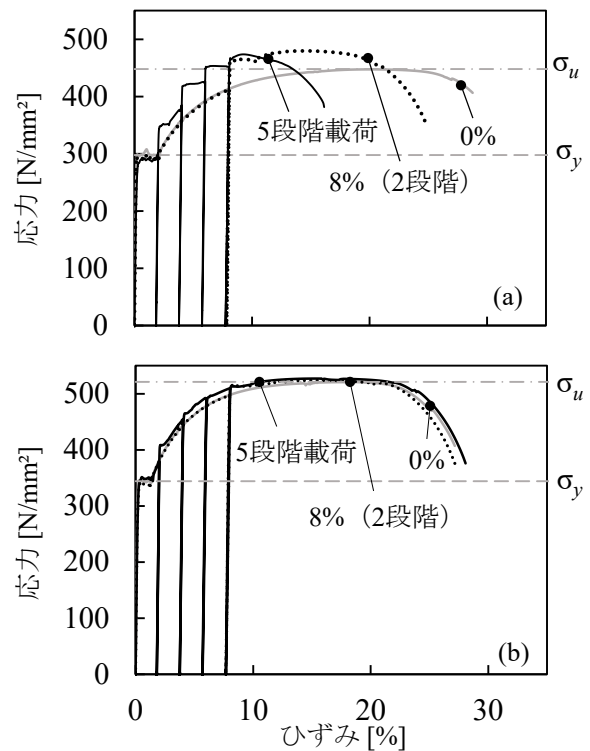


図2 5段階载荷の結果：(a) SS400；(b) SN490B

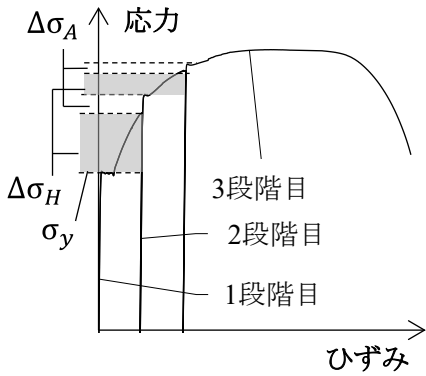


図3 降伏強度上昇率の分解

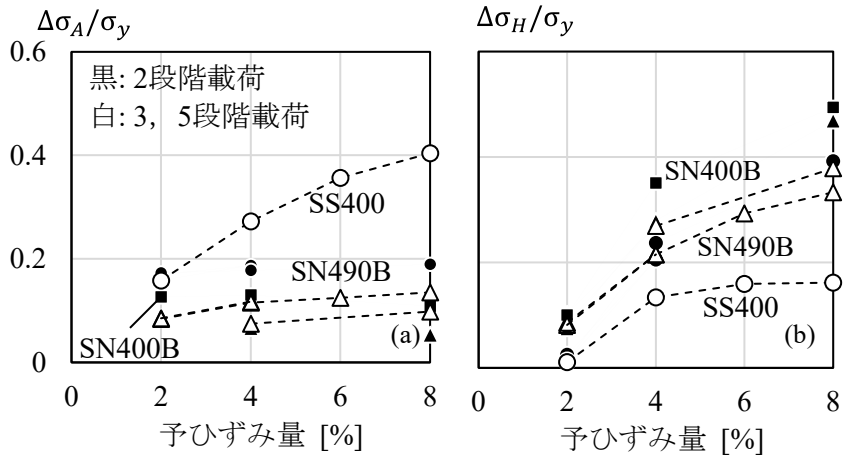


図4 降伏強度上昇率と予ひずみ量の関係：
(a) ひずみ時効の寄与；(b) ひずみ硬化の寄与

有限要素解析モデルを示す。実験と同じ梁端から520 mm, 1,520 mm の位置で梁の構面外変位とねじれを拘束し、梁端に繰返し荷重を与えた。シェルには、積分点を平面方向に4つ、板厚方向に5つ持ち、幾何学的非線形性を考慮した4節塑性化と局部座屈を生じる、梁端から梁せいの1.04 倍までを、各要素のアスペクト比が1:4 以下になるように、軸方向に50分割、フランジを20分割、ウェブを40分割した。鋼材の弾性係数を $2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比を0.3 とした。ひずみ硬化を、バイリニア型の等方硬化

則と Armstrong-Frederick 則の移動硬化則⁸⁾を合わせた複合硬化則で表し、中川⁷⁾が実施した繰返し荷重試験結果と整合するように各パラメータを校正した(図7参照)。線形座屈解析で得た2次座屈モードを、ウェブの最大不整がJIS 3192の許容の25%となる初期不整を導入した(図8(a))。初期不整12.5%、25%、50%を比較したところ、初期不整の大きさは、 $\pm 0.02 \text{ rad}$ のあとの残留変形(図8(b))に影響したが、 $\pm 0.05 \text{ rad}$ のあとの残留変形(図8(c))に違いを生じなかった。

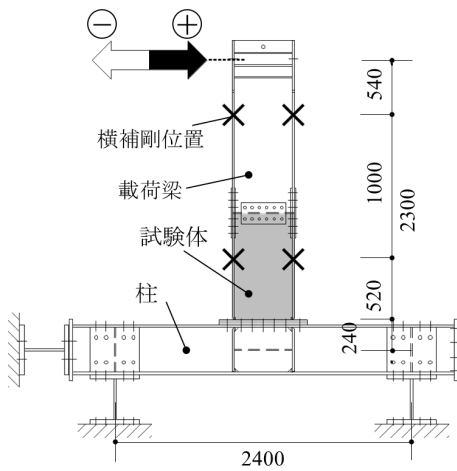


図5 中川⁷⁾の試験体と実験装置

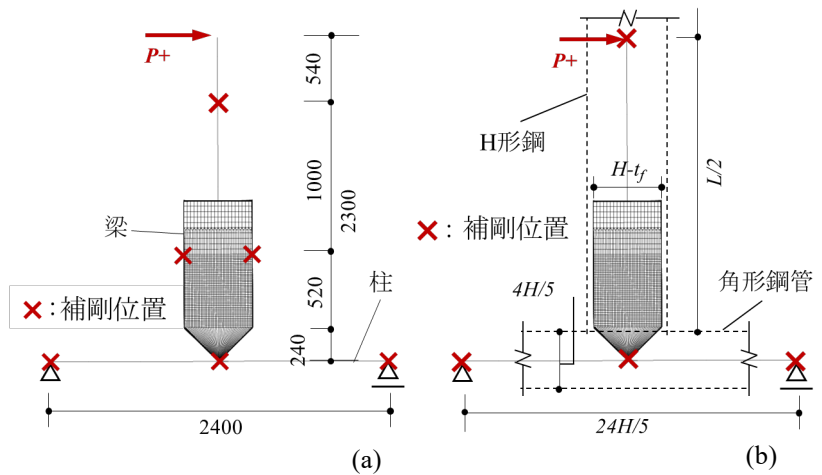


図6 解析モデル：(a) 中川⁷⁾の実験；(b) パラメータ解析

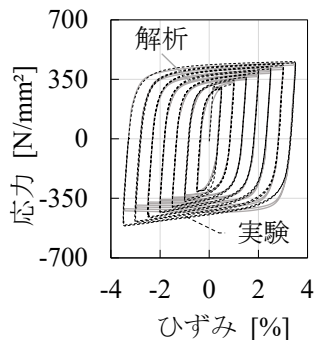


図7 SS400 鋼材の応力-ひずみ関係

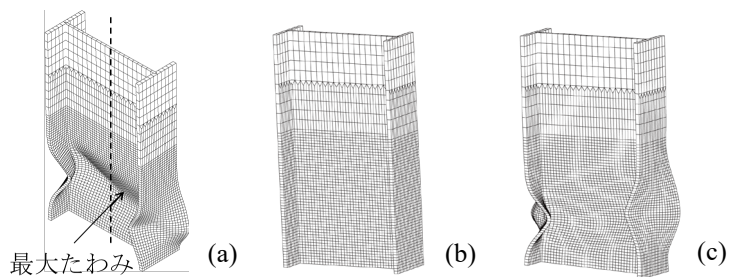


図8 変形量：(a) 初期不整；(b) $\pm 0.02 \text{ rad}$ のあとの残留変形；
(c) $\pm 0.05 \text{ rad}$ のあとの残留変形

較正した方法を用いて、スパン・せい比が $L/H = 6.0, 8.4, 10, 12, 15$ の 5 つ、断面が常時圧延される JIS 規格の H 形鋼のうち、せいが 400 mm 以上の細幅とせいが 500 mm 以上の中幅断面の 14 種類、鋼材が実験と同じ 3 種、の合計 210 の有限要素法モデルを作成した。図 6(b) に例示するように、柱の上下端、柱梁節点の他、設計基準が定める最小横補剛より 1 つ多い点に設け、それらの点で構面外変位とねじれを拘束した。モデルに ± 0.01 rad までの繰返し載荷を与えたあと、層変形角が 0 rad になるように除荷し、続いて ± 0.02 rad までの繰返し載荷を与えたあと除荷し、さらに ± 0.01 rad までの繰返し載荷を与えた。2 回の除荷点で、残留変形が JIS G 3192 と ASTM A6 が規定する H 形鋼の寸法不整の許容限界を超えるかどうかを判定した。鋼材種 SS400、スパン・せい比 $L/H = 8.4$ に対する判定結果を図 9(a) に、スパン・せい比 $L/H = 12$ に対する判定結果を図 9(b) に示す。点線で、梁の幅厚比区分を示す。 ± 0.02 rad のあと許容限界を超えたものを Δ 、 ± 0.01 rad のあと許容限界を超えたものを \times で示す。中川 ⁷ が述べたように、形状不整に基づいて、 ± 0.02 rad を超える塑性変形量を経験したかどうかを、安全側に判定できる可能性がある。しかし、幅厚比が FA の制限値に近い梁は、 ± 0.01 rad のあとで許容限界を超えるので、この簡易判定法があまりに安全側に偏っている可能性がある。スパン・せい比 L/H が大きいほど残留変形が小さくなるが、これはスパン・せい比 L/H が大きいほど梁の剛性が小さくなり、総変形量に占める塑性変形量が小さくなるからである。

5. 結論

鋼材リユースの判定技術を確立する目的で、2 つの検証を行った。まず、複数回の予ひずみと養生を繰り返す引張試験を実施して、ひずみ硬化とひずみ時効を定量的に分析した。残留変形に基づいて、経験した塑性変形量を評価する方法の一般性と適用範

囲を把握するために、有限要素法モデルによるパラメータ解析を実施した。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) FN 含有量が 0.006 wt% の鋼材は、予ひずみと養生を繰り返すたびに、降伏強度に占めるひずみ時効の寄与が大きくなり、伸びが減少した。FN 含有量が 0.002、0.003 wt% の鋼材は、このような傾向を示さなかった。
- 2) JIS の寸法不正の許容限界にあれば、梁が経験した層変形角はせいぜい ± 0.02 rad である、という簡易判定法は、確実に安全側の判定を与えるが、スパン・せい比 $L/H = 8.4$ の梁に対しては、安全側に偏りすぎている。

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] Alex S et al.: Characteristics of strain aging in sd345 reinforcement and its effects on repaired structures. *Proceedings of the 17th Annual Meeting of Japan Association for Earthquake Engineering*, 2022.12
- [6] Yang S ほか: Residual performance of structural steel after plastic deformation and strain aging, *日本建築学会北海道支部研究報告集*, 92, pp 107-110, 2019.6
- [7] 中川春香ほか: 塑性変形とひずみ時効を経た鋼梁の残存耐震性能と形状不整 鋼構造年次論文報告集, 30, pp 497-506, 2022.11
- [8] ADINA R&D, Inc, *Theory and Modeling Guide*, ADINA 9.8, 2022.4
- [9] Huang Y et al.: *Simulating the Inelastic Seismic Behavior of Steel Braced Frames Including the Effects of Low-Cycle Fatigue*, PEER Report, 2010/104, 2010.4

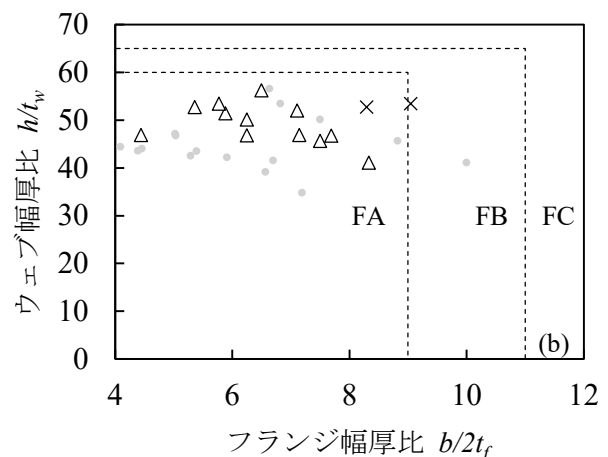
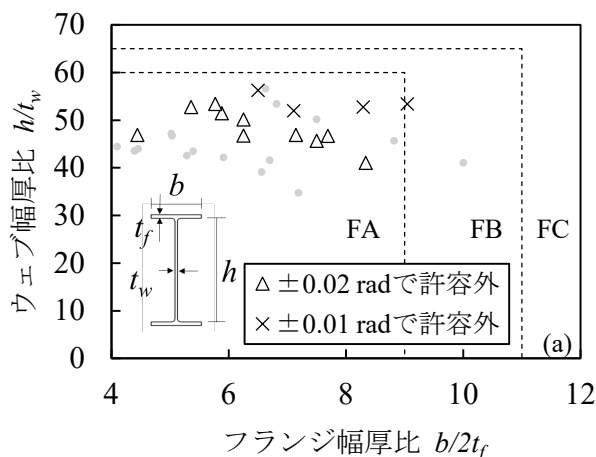


図 9 SS400 鋼材の形状不整の判定 : (a) $L/H=8.4$; (b) $L/H=12$