

1. はじめに

供用を終えて解体される鋼構造建築物から、柱や梁などの部材を採取して、新設建築物に再利用する、リユースを推進することは、持続成長可能社会を構築するために重要な試みである。そこでは、地震による被害を受けた鋼材が、リユース可能かどうかを判断するための科学的根拠が求められる。問題になるのは、どの程度の塑性変形まで許容できるか、である。塑性変形と除荷を経験した鋼材を、ある程度の時間放置すると、降伏強度が上昇し、塑性変形能力が低下するなど、機械的性質が変化する。この現象を、ひずみ時効という。本研究では、鋼材に生じ得るひずみ時効を把握するために、代表的な建築構造用鋼材について、二段階で引張試験を行った。

2. 既往の研究

鋼材にひずみ時効が起きる理由は、塑性変形を受けた状態で、より大きな加工量を経験した部位にリユース帯という転位の塊が生じ、その後、時間が経つにつれて鋼材中の炭素や窒素が転位周辺に拡散され、転位の移動を阻むためだとされている<sup>1)</sup>。ひずみ時効は、冷間成形鋼管の角部の材料特性に悪影響を及ぼすため、その影響を除去するための処理方法が課題とされてきた。

山田ら<sup>2)</sup>は、予ひずみ量、時効時間、自由窒素含有量がひずみ時効に及ぼす影響を把握するため、SS400鋼材について、単調引張試験および引張・圧縮繰返し試験を行った。所定の単調載荷（2.5、5、7.5、10%）または繰返し載荷を実施し、常温で3日、1週、2週、1ヶ月、3ヶ月、6ヶ月の時効時間を与えた後、単調または繰返し載荷を再開し、試験体を破断した。ひずみ時効は3ヶ月で安定すること、自由窒素含有量が多いほど降伏強度が大きく上昇すること、予ひずみ量が大きいほど降伏強度が上昇し、破断伸びが低下すること、などが観察された。

堀川<sup>3)</sup>は、ひずみ時効を受けにくい鋼材を選別するために、12種類の建築用鋼材を用い、時効処理（250℃の油槽に1時間浸漬）を変えず、予ひずみ量（3、5、10、15、20%）だけを変えた引張試験片に対して、シャルピー衝撃試験を行った。鋼材種、化学成分に関わらず、ひずみ時効による脆化は少なくないことと、SM41B（現SM400B）、SM50B（現SM490B）、SM50YB（現SM490YB）に対して、予ひずみ量3%が冷間塑性加工量の許容値として1つの目安となる値であると示した。

小野ら<sup>4)</sup>は、鋼材の元素含有量に注目して、引張予ひずみ（5、10、15%）を与え、時効処理（250%に加熱し1時間保持した後空冷）したSN490鋼材に対して、引張試験やシャルピー衝撃試験を行った。化学成分によらず、予ひずみ量5%でどの鋼材も、塑性変形能力をほぼ損なわれた。また、一般的な測定法による全窒素含有量でなく、自由窒素やチタンの含有量が、ひずみ時効との相関が高い指標であることを確認した。

藤本ら<sup>5)</sup>は、ひずみ径路の違いが、鋼材の降伏条件に与える影響を把握する目的で、構造用鋼材SS41（現SS400）

やSM50A（現SM490A）を含む6種類の金属に、引張・圧縮・せん断の3種類の予ひずみを与え、100℃の湯中に1時間浸漬時効処理を施したあと、単調引張試験を行った。ひずみ時効は、降伏強度に大きな影響を与えたが、引張強度と破断時の応力には影響しなかった。また、ひずみ時効を塑性理論で表現する試みを紹介している。

加藤ら<sup>6)</sup>は、厚鋼板が冷間成形を受けて角形鋼管STKR41が製造される過程で生じる、寸法と機械的特性の変化、さらに残留応力を測定した。元板と比較して角形鋼管は、厚さが増大し管軸が伸びていた。また予ひずみによって降伏強度が1.45~1.74倍に上昇したが、引張強度の上昇はほとんどなかった。

3. 実験概要

SS400、SN400B、SN490Bの3種類のH形鋼について、それぞれのフランジとウェブから、図1に示すJIS 1A号引張試験片を採取した。図2に、試験片の採取位置を、H形鋼の断面に対して示す。表1に、ミルシートに基づく各鋼材の機械的性質を示す。図3に示す計測治具を製作し、図1に示す標点距離 $L_0$ の変化量を正確に計測し、それに基づいて工学ひずみを算定した。まず、2、4または8%の予ひずみを与え、常温で1ヶ月間放置した後、破断まで引張を継続した。この時効時間は、山田ら<sup>2)</sup>が指摘した、安定するまでに必要な期間の3か月より短かった。鋼材種について、単調引張試験を一体実施した。試験は容量1,000 kNの万能試験機を用いて行われた。

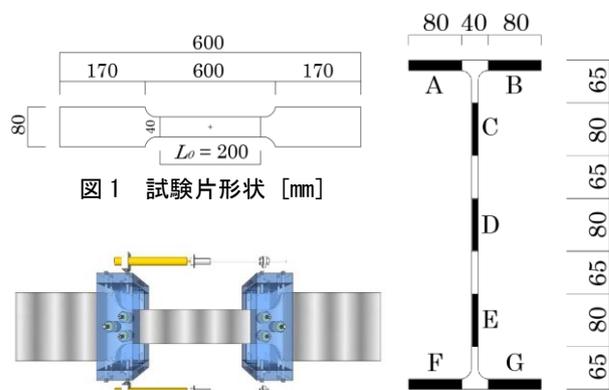


図1 試験片形状 [mm]

図3 計測治具の付着形状 図2 H形鋼断面 [mm]

表1 試験体の機械的性質

鋼材	SS400	SN400B	SN490B
降伏点 [N/mm <sup>2</sup> ]	310	314	364
引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	454	469	531
破断伸び [%]	30	29	28
降伏比 [%]	68	67	69
C含有量 [%]	0.15	0.16	0.16

#### 4. 実験結果と考察

図4と5に、鋼材（SS400、SN400B、SN490B）と部位（フランジ、ウェブ）ごとに、応力-ひずみ曲線を示す。各グラフに、ミルシートに記載された、降伏強度と引張強度も示す。予ひずみ量を0%と表示した曲線は、一段階で破断まで引っ張った場合である。程度の違いが認められるが、全ての鋼材にひずみ時効が表れた。つまり、一度目の载荷では、降伏棚を超えてひずみ硬化域に入ってから、除荷された。二度目の载荷では、降伏棚が再出現し、一度目よりも高い降伏強度を示したが、引張強度は変わらず、破断伸びは小さくなる傾向があった。

鋼材別に比較すると、ひずみ時効は、SS400に最も顕著に表れ、SN490Bにあまり現れなかった。部位別に見ると、フランジよりもウェブに、より顕著に表れた。つまり、ひずみ時効は、SS400のウェブで最も顕著に表れ、SN490Bのフランジではあまり表れなかった。ただ、ウェブでは、一度目の载荷でも、4つの試験片で、降伏強度が10%程度違った。ウェブからは、図2に示す断面部位CとDから2本ずつの試験片を採取したのだが、この両者で、機械的特性に若干の違いが確認されたのである。

山田ら<sup>2)</sup>や小野ら<sup>4)</sup>は、予ひずみ量が大きいほど、破断伸びが小さい傾向を報告したが、本研究では、山田ら<sup>2)</sup>と同じSS400のみこの傾向が見られ、SN400BとSN490Bでは全く現れなかった。

鋼材種別で、ひずみ時効に違いがあった原因は、小野ら<sup>4)</sup>も指摘した通り、自由窒素やチタンの含有量が影響したものと推察される。今後、元素分析を実施して、この原因の考察を進める予定である。

#### 5. まとめ

鋼材に生じるひずみ時効を把握するために、代表的な建築構造用鋼材（SS400、SN400B、SN490B）について、フランジとウェブから試験片を採取して、二段階で引張試験を行い、以下の知見を得た。

1. 予ひずみを導入して1ヶ月間放置したあと、再度引張载荷すると、降伏棚が再出現し、予ひずみ量に比例して、一度目より高い降伏強度を示した。ただ、SN490Bでは、この変化が小さかった。この理由を把握するために、今後、窒素含有量を分析する。
2. 既往の文献でも指摘される通り、二度目の载荷で、引張強度は変わらなかった。予ひずみ量に応じた破断伸びの低下は、SS400材のウェブでのみ見られ、SN400BとSN490Bではフランジでもウェブでも見られなかった。

#### 参考文献

- 1) K. C. Park : Leveling of Aged Low Carbon Steel Sheets in order to Prevent Shape Defects after Stamping, Transactions of Materials Processing, Vol.24, No.4, pp. 241-247, 2015.5
- 2) 山田哲ほか：ひずみ時効を受けた鋼材の履歴性状—その1 要素試験—、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 927-928、2006.9
- 3) 堀川浩甫：冷間塑性加工に伴う構造用鋼材のひずみ時効脆化、土木学会論文報告集、第300号、pp. 13-20、1980.8
- 4) 小野徹郎ほか：予歪を受けた建築構造用鋼板の靱性に及ぼす微量元素の影響、日本建築学会構造系論文集、第536号、pp. 157-162、2000.10
- 5) 藤本盛久ほか：構造用金属材料の力学的挙動に及ぼすひずみ履歴の影響：その4. ひずみ時効・パウシンガー効果・降伏曲面の検討、日本建築学会論文報告集、第272号、pp. 31-40、1978.10
- 6) 加藤勉ほか：冷間成形角形鋼管の塑性ひずみ履歴と残留応力、日本建築学会構造系論文報告集、第385号、pp. 39-48、1988.3

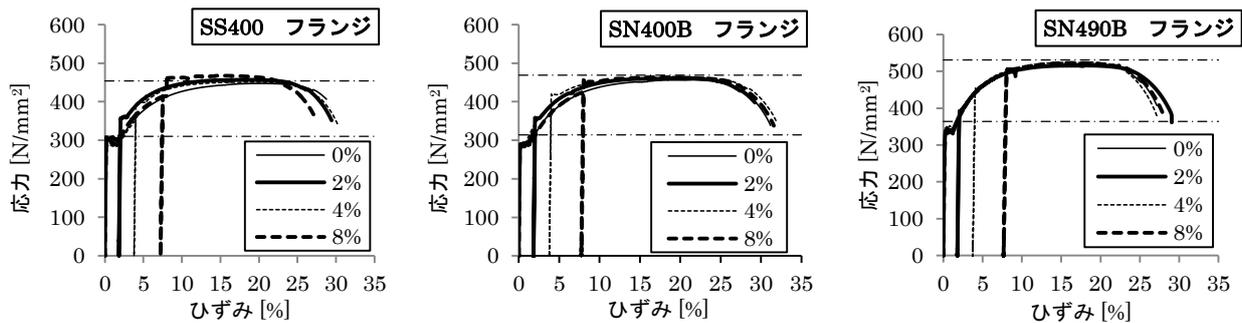


図4 フランジの応力-ひずみ履歴曲線

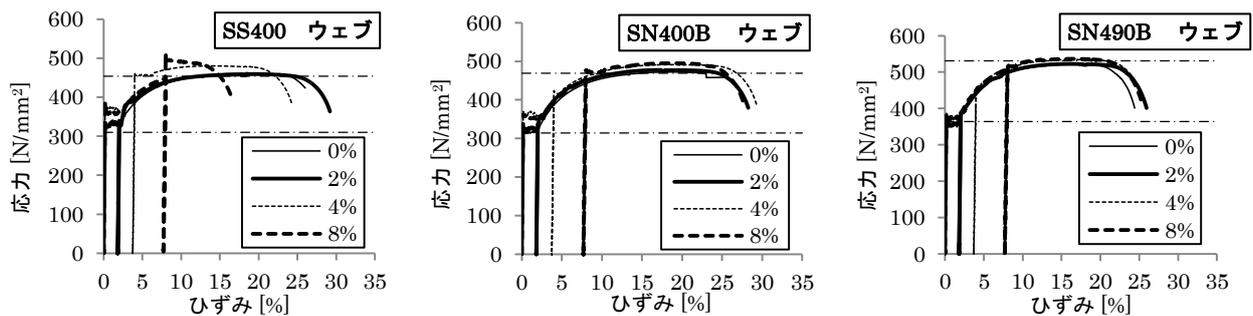


図5 ウェブの応力-ひずみ履歴曲線