

## 誘導加熱曲げ加工を受けた鋼材の機械的性質 Mechanical Properties of Structural Steel Curved by Induction Heating

○北村 光太郎・倉田 真宏・中安 誠明

○Kotaro KITAMURA, Masahiro KURATA, Nariaki NAKAYASU

This study examines the influence of induction heating bending on the mechanical properties of small-section structural steels. Temperature histories during bending were measured using a thermographic camera, and tensile tests were conducted before and after processing. Hot-rolled H-shaped steels showed only minor reductions in yield strength, while tensile strength and elongation remained nearly unchanged, and all specimens satisfied nominal strength requirements. In contrast, cold-formed square steel tubes exhibited significant yield strength reduction, especially at corner regions, accompanied by increased elongation due to the tempering of cold-work hardening. Statistical evaluation indicated that H-shaped steels retained a high probability of meeting material specifications after processing.

### 1.はじめに

曲線部材は、駅舎やスタジアムの屋根部材、キャノピーや螺旋階段、歩道橋に数多くの適用例があり<sup>1)</sup>、3次元モデリングツールや施工技術の向上により、更なる普及が見込まれる。曲線部材を製作する曲げ加工は冷間と熱間に分けられる。熱間加工では、初期不整や残留応力の発生、加工硬化が少なく<sup>2)</sup>、空冷では破断伸びも大きく変化しない<sup>3)</sup>。しかしながら、熱加工による機械的性質の変化や複雑な応力分布を理由として、使用例の多くは弾性部位である。主要部材以外では、強度と靱性をバランスよく向上する補強材としての利用が提案されている<sup>4)</sup>。

本論では、誘導加熱曲げ加工を受ける鋼材の加熱時間や温度が機械的性質に与える影響を調査し、塑性化部位への利用条件の緩和の可能性を分析した。サーモグラフィカメラを用いて、曲げ加工時の温度履歴と温度分布を測定し、加工前後の鋼材の引張試験から機械的性質の変化を調べた。パラメータとして、鋼種、曲げ半径、部位などを考慮した。

### 2.誘導加熱曲げ加工鋼材の熱履歴

図1のように鋼材試験体の誘導加熱曲げ工程をサーモカメラで撮影し、曲げ部材表面の熱履歴を測定した。

熱履歴の分析においては、非調質鋼（圧延まま、焼きならし）は加熱の影響を大きく受ける製造プロセス（固溶強化、析出強化、加工硬化、結晶粒

微細化強化など）がないため加熱の影響は小さく、変態完了温度（600～700℃）以上に加熱すると強度が低下する<sup>5)</sup>。そこで、測定した温度分布時系列データから部材断面内の測定点が600℃以上となる加熱時間（以下、600℃以上加熱時間）を調査することとした。

断面、鋼種、曲げ半径、加熱部位の違いによる機械的性質の変化を調べるため、以下のように鋼材試験体のパラメータを設定した。（断面、鋼種、曲げ半径、曲げ方向、部位）をもって試験体の名称としている。断面としては、熱間成形のH形鋼(H)と冷間成形の角形鋼管(HSS)、鋼種SN400(400)、SN490(490)、BCR295(295)を採用した。曲げ半径は過去の研究で構造部材として有効な高ささと長さの比(H/L)が1.5～3.0を対象とした。H/Lの下限である1.5、上限の3.0に相当する曲げ半径をそれぞれShort(S)、Long(L)として算定した。曲げ方向は強軸、弱軸をそれぞれStrong(S)、Weak(W)、測定部位はH形鋼フランジ、ウェブをそれぞれFlange(F)、

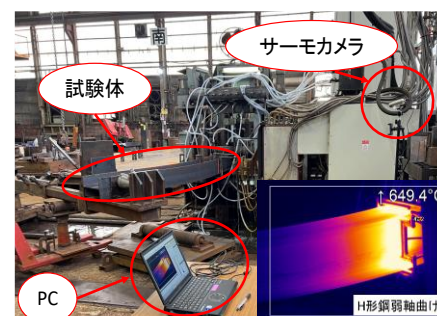


図1 熱履歴の計測様子とソフトウェア画面

Web(W), 角形鋼平板部, 角部をそれぞれ Flat Region(Fr), Corner Region(Cr)として表示している. H 形鋼の強軸曲げ, 弱軸曲げの違いによる最大温度の差は 50℃で, 600℃以上加熱時間の差が 20 秒ある. また, 弱軸曲げのなかでもフランジ, ウェブの違いによる最大温度の差が 60℃, 600℃以上加熱時間の差が 30 秒あった.

### 3.加工前後の機械的性質

各試験体の機械的性質について, 図 2 に降伏強度比, 図 3 に引張強さ比, 図 4 に破断伸びを示す. ここで,  $\sigma_{yc}$ ,  $\sigma_{y0}$ は加工後, 加工前の降伏応力,  $\sigma_{tc}$ ,  $\sigma_{t0}$ は加工後, 加工前の引張強さである. H 形鋼試験体の H400SSF と H400LSF, H400SWF と H400LWF を比較すると, 曲げ半径が材料に及ぼす機械的特性の影響はほとんどなかった. 強軸曲げフランジの試験体では, H400NNF と H400SSF, H400LSF の比較において加熱の影響で加工前から降伏応力が約 10%低下したが, 引張強さは大きく変化しなかった. 他方, 最高温度が 670℃に達した H490NNF と H490LWF の比較では, 加工前後で引張強さ, ヤング係数は変化しないが, 降伏強度が約 7%低下した. 弱軸曲げでは, ウェブ, フランジともに加工前後で降伏強度と引張強さには変化しなかった. 破断伸びについては, H 形鋼のどの鋼材においても加工前後で大きく変化しなかった.

冷間成形された角形鋼管では, 誘導加熱曲げ加工の影響が大きかった. 平板部の試験体は HSS295NNFr と HSS295LNFr の比較において加工前から降伏強度が約 20%低下し, 引張強さが約 5%低下した. 一方, 破断伸びについては約 80%上昇した. 角部では HSS295NNCr と HSS295LNCr の比較から加工前から降伏強度が約 40%低下し, 引張強さが約 20%低下した. 以上から角形鋼管では加工後の強度が引張強さは公称値 400N/mm<sup>2</sup>を大幅に上回っているが, 降伏強度は公称値 295N/mm<sup>2</sup>を僅かに上回る結果となった. 一方で,

破断伸びについては加工後にその値が大きくなったが, これは冷間成形による硬化が焼き戻しされた形であり, その影響は平板部より角部に大きい.

### 4.結論

以下に得られた知見をまとめる.

- ① H 形鋼の強軸曲げ, 弱軸曲げでは最大温度の差が 50℃, 600℃以上加熱時間の差が 20 秒あった. また, 弱軸曲げの中でも断面内のウェブとフランジで最大温度の差が 60℃, 600℃以上加熱時間の差が 30 秒あった.
- ② SN 材の H 形鋼では降伏応力や引張強さに約 10%の低下が見られたが, 実勢値を考慮すれば公称値を大きく上回った. 伸び能力に変化はなく, 曲げ加工前と同様の機械的性質を有するとして使用できる可能性が高い.
- ③ 冷間成形角形鋼管 (BCR295) では, 角部では降伏強度が約 40%低下し, 公称値を約 5%しか上回らなかった. よって, 公称値とは異なる性能を期待する場合などには, 前記の変化を念頭に置く必要がある.

### 謝辞

本研究は, 曲げ加工及び熱履歴の計測に際して, 北陸建工 (株) ならびに北陸鋼産 (株) にご助言とご協力をいただいた. ここに記して謝意を表す.

### 参考文献

- [1]倉田真宏ら: 鋼構造の施工・製作における情報技術利用と 3 次元造形, JSSC テクニカルレポート No.133, 2024.3
- [2]Bo Doeswell: Design Guide 33 Curved Member Design, AISC, 2018
- 廣畑幹人, 根津海都, 中山太士, 松井繁之: 火災を想定した加熱 [3]冷却履歴が経年橋梁鋼材の材料特性に及ぼす影響, 鋼構造論文集, 第 24 巻, 第 95 号, pp.49-57, 2017 年 9 月
- [4]Lin K.-S., Kurata M., Kawasaki Y., and Kitatani Y. (2024), Investigation of low-disturbance seismic retrofit method for steel column bases using curved members. Jpn Archit Rev, 7: e12429.
- [5]国土交通省 国土技術政策総合研究所 一般社団法人 日本橋梁建設協会: 塑性変形した鋼橋の部材矯正に用いる熱間加工に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料, 第 1108 号, 2020 年 4 月

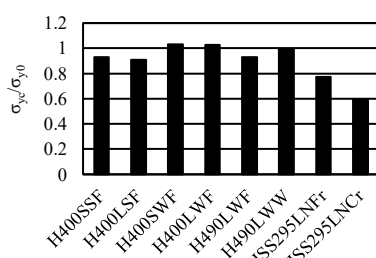


図 2 降伏強度比

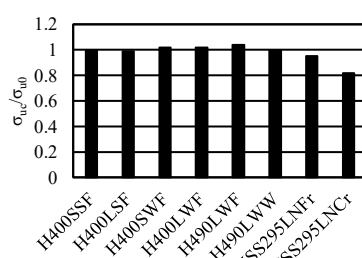


図 3 引張強さ

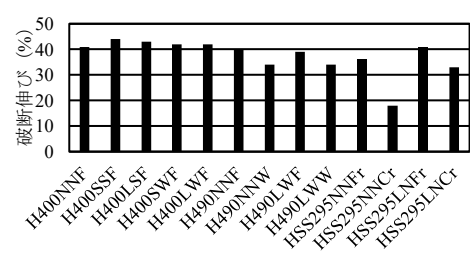


図 4 破断伸び