

圧延 H 形鋼の残留応力の軽減

論文

吉田 博*・佐々木 徹*²・近藤 信行*
田中 智夫*³・奥村 寛*⁴

Reduction of Residual Stress in Rolled H-beam

Hiroshi YOSHIDA, Tooru SASAKI, Nobuyuki KONDO,
Tomoo TANAKA, and Hiroshi OKUMURA

Synopsis :

In a hot-rolled H-beam, covering the upper surface of web by insulator (web-insulating) and cooling the outside surface of flange by water (flange-cooling by water) after rolling are considered effective measures for reducing the residual stress. To confirm this, the relation between the residual stress and the time of their treatment under various finishing temperature conditions was investigated using the analytical method for thermal stress. This method is characterized by taking phase transformation into consideration.

The outline of results obtained is as follows;

(1) The longer the time to insulate web or to cool flange after rolling is and the smaller the difference in finishing temperature between flange and web is, the lower the tensile residual stress in flange and the compressive residual stress in web are. Namely the residual stress is reduced in the whole cross section in this case.

(2) In the case of large size H-beam (H : 900×300×16×28 mm), the time to cool flange (heat transfer coefficient : 250 kcal/m²·h·°C) after rolling for reducing the residual stress in web is about a quarter of the time to insulate web.

(3) It is possible to reduce the residual stress below the required value by combining the control of the difference in finishing temperature with the control of the difference in cooling rate between flange and web after rolling.

(4) The choice of either web-insulating or flange-cooling by water after rolling should be made by considering the influence on the metallurgical quality and the ease of control as well as the effect of reducing residual stress.

1. 緒 言

圧延H形鋼には、最終圧延（仕上げ圧延）時のフランジとウェブの温度差（仕上げ温度差）およびそれ以後の冷却速度差に起因して、フランジに引張り、ウェブに圧縮の残留応力が存在する。特に、フランジとウェブの板厚比 (t_f/t_w) が大きい大形サイズ(ウェブ高さ 600~900 mm, フランジ幅 300 mm) では、発生する残留応力が大きく座屈現象による不良品(ウェブ波)の発生、2次加工時の残留応力解放再分布による変形および割れ、構造部材としての耐力の低下などの問題を引き起こしやすい。

残留応力を軽減させるには、仕上げ温度差と仕上げ圧

延後の冷却速度差を小さくすればよく、そのためには仕上げ圧延の前後で肉厚の厚いフランジ部を強制冷却するか、肉厚の薄いウェブを保温あるいは加熱すればよい。具体的な方法として、仕上げ圧延前工程でのフランジ水冷¹⁾あるいはウェブ鏡保温²⁾、仕上げ圧延後のフランジ水冷³⁾あるいはウェブ断熱材保温²⁾(ウェブ面への石綿、カオウル等の載荷)、冷却床上でのH形鋼のI姿勢密着配列³⁾などが提案されている。しかし、残留応力のある値以下に制御するには、それぞれの方法について残留応力軽減効果の定量的な把握が必要である。前報⁴⁾では、仕上げ圧延後の放冷材の仕上げ温度条件と残留応力との関係について、著者らが開発した相変態を考慮した熱応力計算法⁵⁾を用いて詳細に検討した。その結果、

昭和 58 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 58 年 2 月 10 日受付 (Received Feb. 10, 1983)

* 川崎製鉄(株)技術研究所水島研究部 (Mizushima Research Dept., Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Mizushimakawasakidori Kurashiki 712)

*² 川崎製鉄(株)技術研究所 (Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)

*³ 川崎製鉄(株)技術研究所水島研究部 工博 (Mizushima Research Dept., Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)

*⁴ 川崎製鉄(株)水島製鉄所 (Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp.)

仕上げ圧延前工程でフランジ水冷あるいはウェブ鏡保温を行って仕上げ温度差を小さくしても、残留応力軽減効果は不十分であることが明らかとなった。

本報告は、仕上げ温度差制御と圧延後のウェブ断熱材保温（以後ウェブ保温と称す）あるいはフランジ水冷を組み合わせた場合の残留応力軽減効果について検討したものである。

2. 解析手法の概略

解析手法については前報ですでに報告⁴⁾⁵⁾ しているので、ここでは概要だけを述べる。断面内の温度分布は、長手方向（圧延方向）の熱流を無視した2次元のFourierの熱伝導方程式（相変態による発熱を含む）をIAD法⁶⁾⁷⁾ と呼ばれる特殊な差分法を用いて計算した。応力とひずみは、材料が長く板厚が薄いので長手方向のみを考え、しかも横断面は平面を保持するという仮定を設けて計算を行った。上記計算に必要な物性値（比熱、熱伝導率、熱膨張係数、ヤング率、降伏応力）は、温度だけでなく相変態率の関数であるため相変態も同時に計算する必要がある。ただし、ヤング率だけは温度のみの関数としている。変態計算は等温変態曲線を利用して任意の冷却曲線に対する変態挙動を計算する手法を用いた。^{8)~10)}

3. ウェブ保温時の計算

3.1 計算値と実測値との比較

断面寸法がウェブ高さ 808 mm、フランジ幅 302 mm、ウェブ厚 16 mm、フランジ厚 30 mm (H: 808×302×16×30) の大形サイズH形鋼を仕上げ圧延後すぐに断熱材でウェブ上面を覆い（断熱材厚さ約 50 mm）、室温までそのままの状態を冷却した。その時の冷却曲線（フランジ幅 1/4 の外面、ウェブ中央表面）および室温における残留応力の測定値と計算値との比較を Fig. 1 に示す。ただし、計算におけるウェブ部の保温熱伝達率は、温度依存するふく射による項と対流による項 (7.5 kcal/m²·h·°C) との和で与えられる空冷熱伝達率の 1/2 としている。図より明らかなように、冷却曲線、残留応力とも計算値と実測値はよく一致している。

3.2 設定条件

残留応力で問題になりやすい大形H形鋼の中で代表的なサイズである H: 900×300×16×28 を選び、仕上げ温度条件としてはフランジ全体の仕上げ温度 T_{fo} 、ウェブ全体の仕上げ温度 T_{wo} がそれぞれ CASE 1: $T_{fo}=900^{\circ}\text{C}$, $T_{wo}=700^{\circ}\text{C}$ (温度差 200°C), CASE 2: $T_{fo}=900^{\circ}\text{C}$, $T_{wo}=750^{\circ}\text{C}$ (温度差 150°C), CASE 3: $T_{fo}=800^{\circ}\text{C}$, $T_{wo}=700^{\circ}\text{C}$ (温度差 100°C) の3条件を

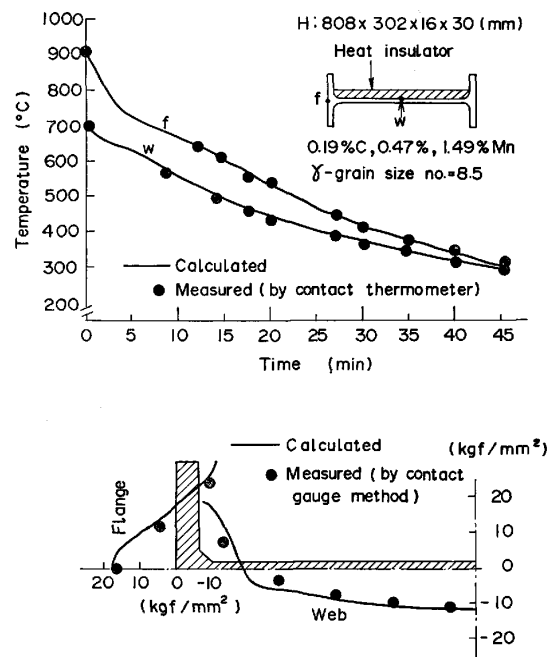


Fig. 1. Comparison between calculated and measured values at insulating the web.

選んだ。このサイズの通常の仕上げ温度は CASE 1 あるいは CASE 2 である。CASE 3 の条件は、仕上げ圧延の前工程（例えば、粗圧延機と仕上げ圧延機のローラーテーブル上）でフランジ水冷あるいはウェブ鏡保温を行えば、この条件になる。

断熱材保温処理は、仕上げ圧延後すぐに開始するものとし、保温時間は 0 (空冷) から ∞ (室温) まで考えた。

3.3 計算結果

仕上げ圧延後のウェブ保温時の冷却過程でのフランジ幅 1/4 およびウェブ中央の温度、熱応力、塑性ひずみ、相変態比率の計算結果（板厚平均値）の代表例を Fig. 2 に示す。ただし、仕上げ温度条件は CASE 1 で、ウェブ保温は仕上げ圧延後から ① 0 min (空冷), ② 5 min, ③ ∞ (室温まで) 行つた場合の結果である。また、その時の室温における H 形鋼断面各部の残留応力の計算結果（板厚平均値）を Fig. 3 に示す。また、Fig. 4 に種々の仕上げ温度条件のもとでのウェブ保温時間と断面各部の残留応力との関係を示す。

計算結果から以下のことが認められる。

(1) 保温時間が長いほど、ウェブおよびフランジとも冷却は遅くなり、それに対応して変態の進行も遅くなる。しかし、ウェブ保温がフランジ温度に及ぼす影響はウェブ温度への影響に比べると非常に小さい。(Fig. 2 参照)

(2) 熱応力の冷却過程での変化は、保温時間の長短にかかわらず、フランジでは引張り → 圧縮 → 引張り、

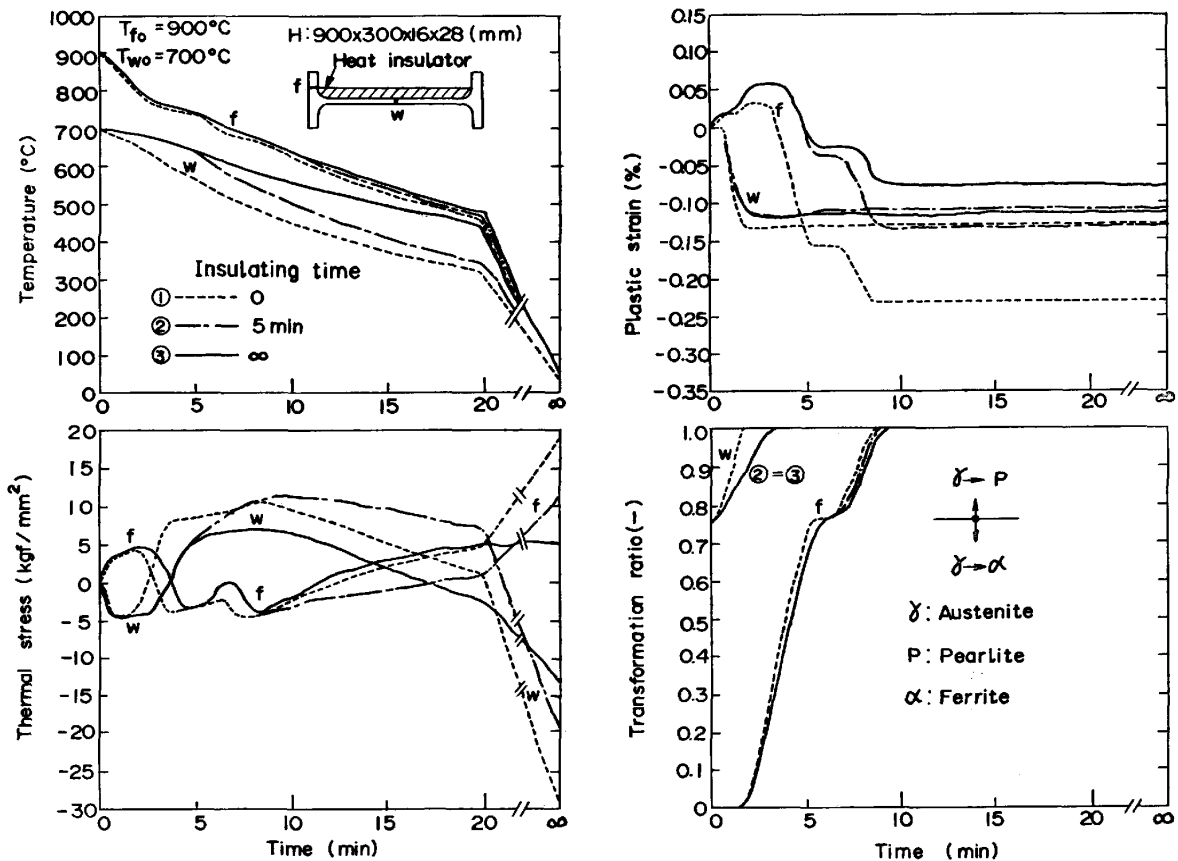


Fig. 2. Changes in temperature, thermal stress, plastic strain, and ratio of phase transformation (mean values in thickness) during cooling at insulating the web.

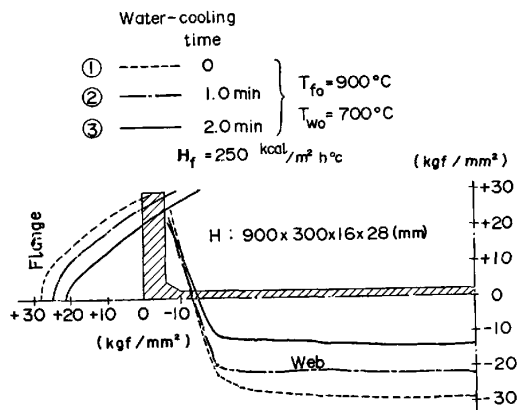


Fig. 3. Residual stress (mean values in thickness) at insulating the web.

ウェブでは逆に圧縮→引張り→圧縮となる。しかし、冷却過程での熱応力の極大、極小値とその発生時期は保温時間の影響を受ける。(Fig. 2 参照)

(3) 熱応力の最初の変化(フランジの引張り、ウェブの圧縮)はウェブの変態と、次の変化(フランジの圧縮、ウェブの引張り)はフランジの変態と対応している。すなわち、変態は、膨張と発熱を伴うため変態速度の速

い部分は圧縮応力、遅い部分は引張応力となる。(Fig. 2 参照)

(4) 塑性ひずみの冷却過程での変化は、ウェブ保温の有無にかかわらず、同一傾向を示す。すなわち、ウェブの変態時(冷却初期)にウェブに圧縮、フランジに引張方向のひずみが生じ、フランジの変態時にフランジに圧縮方向のひずみが生じる。しかし、冷却過程で生じる塑性ひずみ量は、保温時間の影響を大きく受ける。(Fig. 2 参照)

(5) 残留応力分布は、保温時間の長短および仕上げ温度差の大小にかかわらず、同一形態を示す。すなわち、フランジが引張り、ウェブが圧縮応力で、中央部で大きく端部にいくほど小さくなっていき、フランジ先端では圧縮、ウェブのR部近傍では引張応力である。(Fig. 3, Fig. 4 参照)

(6) 保温時間が長いほど、仕上げ温度差が小さいほどフランジ部の引張り、ウェブ部の圧縮残留応力は小さくなり、全体的に残留応力は軽減する。これは、保温時間が長くなるとフランジの変態時に生じる圧縮方向の塑性ひずみが小さくなり、仕上げ温度差が小さくなると仕

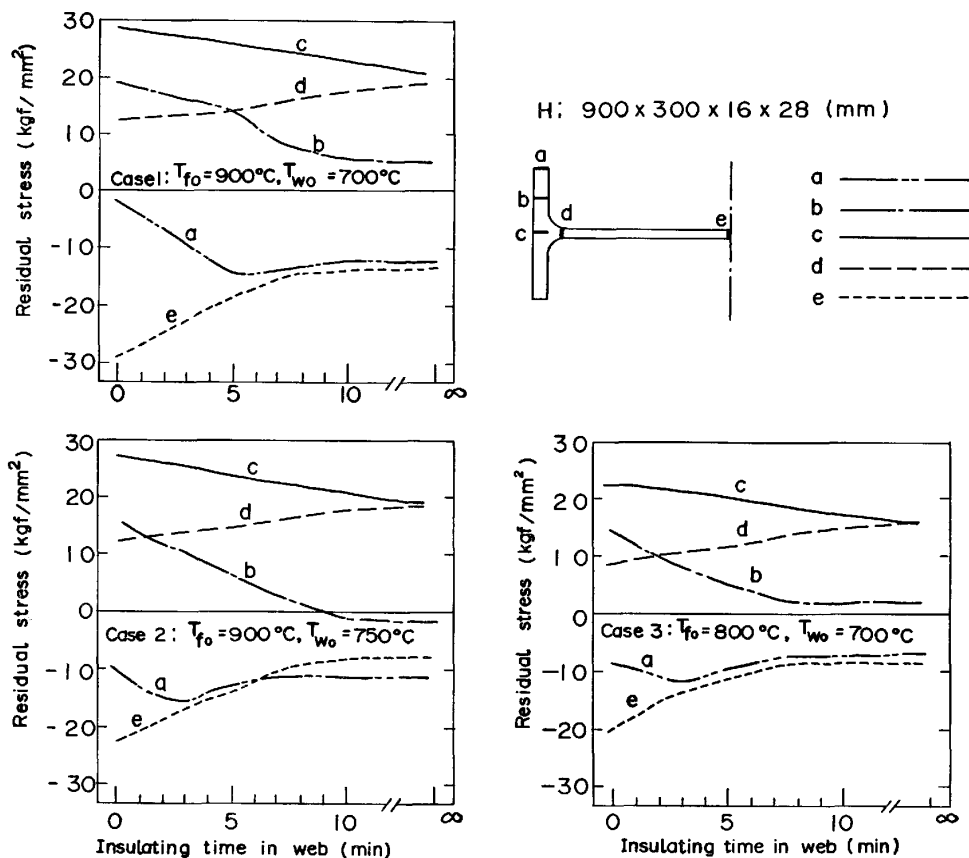


Fig. 4. Relation between residual stress and insulating time in web under various finishing temperature conditions.

上げ圧延後から室温までのフランジとウェブの熱収縮量差が小さくなるためである。(Fig. 3, Fig. 4, Fig. 2 参照)

(7) 圧延後の冷却時に発生するウェブ波⁴⁾および2次加工時の変形と関係の深いのはウェブの圧縮残留応力である。そこで、ウェブ中央部の残留応力を 15 kgf/mm^2 (発生しうる最大残留応力すなわち室温での降伏応力の約 $1/2$) にすることを考えると、その時の保温時間は CASE 1 で 7.5 min , CASE 2 で 4 min , CASE 3 で 2 min 必要である。(Fig. 4 参照)

4. フランジ水冷時の計算

4.1 設定条件

サイズ (H: $900 \times 300 \times 16 \times 28$) および仕上げ温度条件 (CASE 1, 2, 3) とともにウェブ保温の場合と同じ条件を選んだ。フランジの水冷は仕上げ圧延後すぐに開始し、フランジ外面全体を均一に冷却するものとし、その時の水冷熱伝達率 H_f は $250 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ とした。この H_f の値は、異常組織 (ベイナイトあるいはマルテンサイト) 発生による極端な伸び不足を起こさず、しかも均一な冷却制御がやりやすいという条件から選んだ。

4.2 計算結果

仕上げ圧延後のフランジ水冷時の冷却過程でのフランジ幅 $1/4$ およびウェブ中央の温度、熱応力、塑性ひずみ、相変態比率の計算結果 (板厚平均値) の代表例を Fig. 5 に示す。ただし、仕上げ温度条件は CASE 1 ($T_{fo}=900^\circ\text{C}$, $T_{wo}=700^\circ\text{C}$) で、水冷は仕上げ圧延後から ① 0 min (空冷), ② 1 min , ③ 3 min 行つた場合の結果である。また、その時の室温における H 形鋼断面各部の残留応力の計算結果 (板厚平均値) を Fig. 6 に示す。また、Fig. 7 に種々の仕上げ温度条件のもとのフランジ水冷時間と断面各部の残留応力との関係を示す。

計算結果から以下のことが認められる。

(1) 水冷時間が長いほど、フランジの冷却が速くなり、それに対応してフランジの変態の進行も速くなる。(Fig. 5 参照)

(2) 熱応力の冷却過程での変化は、水冷時間の長短にかかわらず、フランジでは引張り→圧縮→引張り、ウェブでは逆に圧縮→引張り→圧縮となる。しかし、冷却過程での熱応力の極大、極小値とその発生時期は水冷時間の影響を受ける。(Fig. 5 参照)

(3) 塑性ひずみの冷却過程での変化は、水冷の有無

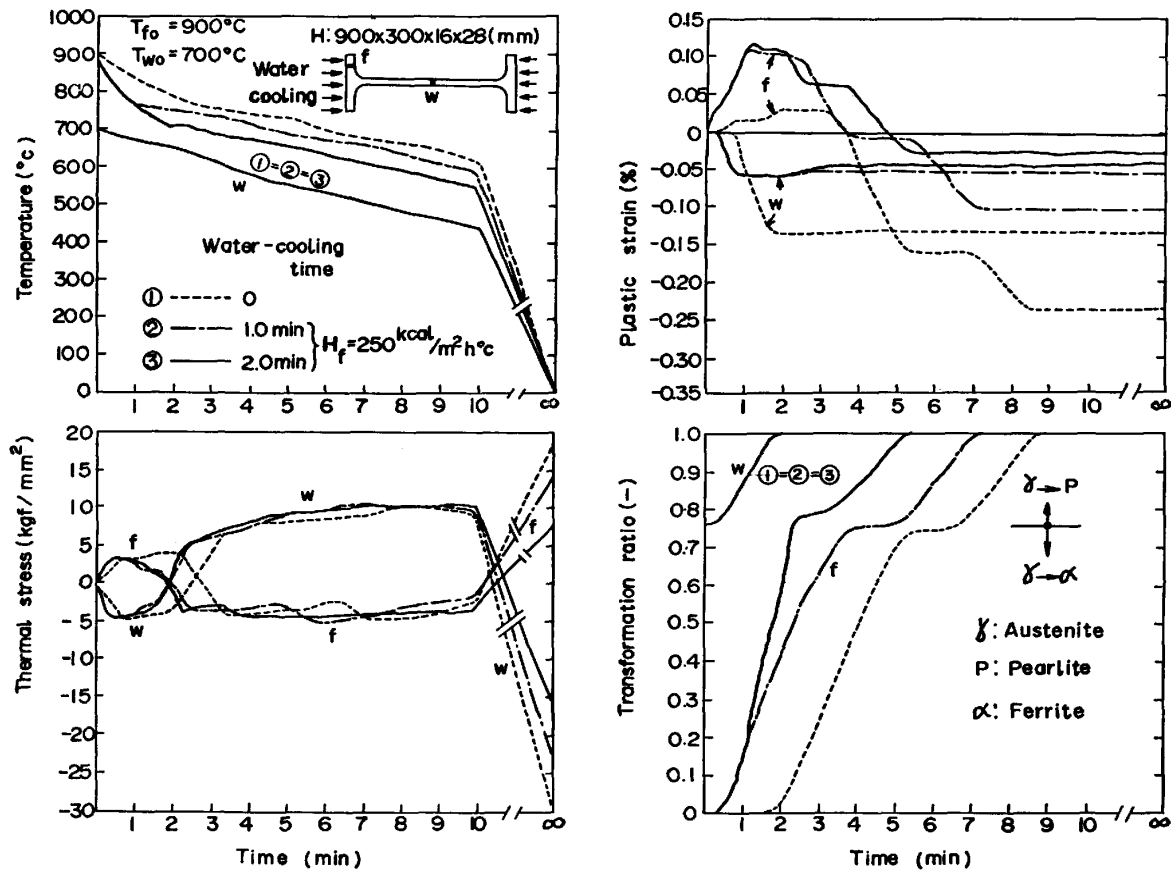


Fig. 5. Changes in temperature, thermal stress, plastic strain, and ratio of phase transformation (mean values in thickness) during cooling at cooling the flange by water.

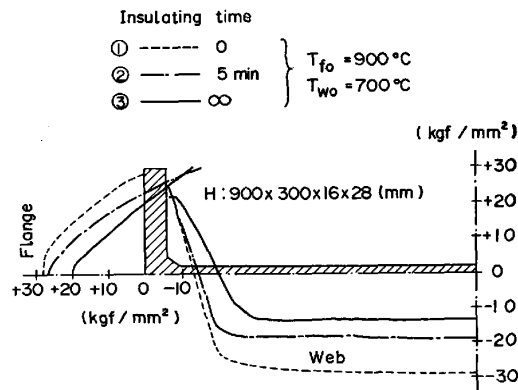


Fig. 6. Residual stress (mean values in thickness) at cooling the flange by water.

にかかわらず同一傾向を示す。すなわち、主としてウェブ変態が進行するときはウェブに圧縮、フランジに引張方向のひずみが生じ、主としてフランジ変態が進行するときはフランジ圧縮方向のひずみが生じる。しかし、冷却過程で生じる塑性ひずみ量は、水冷時間の影響を大きく受ける。(Fig. 5 参照)

(4) 残留応力分布は、水冷時間の長短および仕上げ温度差の大小にかかわらず、同一形態を示す。すなわち、

フランジが引張り、ウェブが圧縮応力で、中央部で大きく端部にいくほど小さくなっていき、フランジ先端では圧縮、ウェブのR部近傍では引張応力である。(Fig. 6, Fig. 7 参照)

(5) 水冷時間が長いほど、仕上げ温度差が小さいほどフランジ部の引張り、ウェブ部の圧縮残留応力は小さくなり、全体的に残留応力は軽減する。これは、水冷時間が長くなるとフランジの変態時に生じる圧縮方向の塑性ひずみが小さくなり、仕上げ温度差が小さくなると室温までのフランジとウェブの熱収縮量差が小さくなるためである。(Fig. 6, Fig. 7, Fig. 5 参照)

(6) ウェブ中央部の圧縮残留応力を 15 kgf/mm² 以下にするためには、水冷時間は CASE 1 で 2 min, CASE 2 で 1 min, CASE 3 で 0.5 min 必要である。(Fig. 7 参照)

5. フランジ水冷とウェブ保温との比較

仕上げ圧延後にフランジ水冷あるいはウェブ断熱材保温の残留応力軽減処理を行う場合のそれぞれの長所、短所を比較してみる。今までの結果より明らかなように、

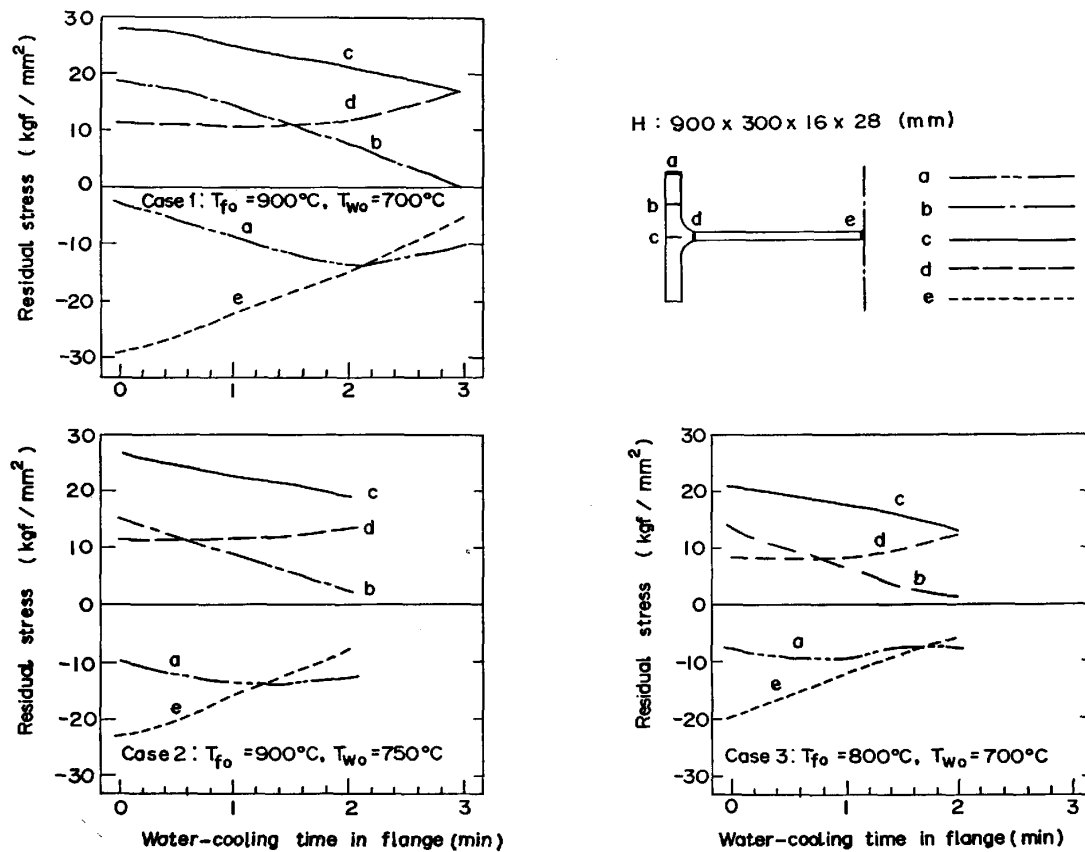


Fig. 7. Relation between residual stress and water-cooling time in flange under various finishing temperature conditions.

フランジ水冷の処理時間は、ウェブ保温のその約 1/4 であり、非常に短い。しかし、フランジ水冷では、長手および幅方向の冷却むらがなくし、しかも残留応力軽減効果を弱めるウェブ面への水乗りを防ぐような高度な冷却技術が必要である。冷却むらは製品の強度、伸びなどの材質変動を伴い、極端な場合は異常組織による伸び不足をもたらす。一方、ウェブ保温では、処理時間が長く断熱材載荷および除去により工程効率を落とす欠点があるが、特別な注意を払わなくても均一な保温（断熱材の厚さは 10 mm 以上あれば保温効果同じ）ができるため、材質変動および残留応力軽減むらの心配がない。

以上のことから、フランジ水冷、ウェブ断熱材保温ともそれぞれ長短があるため、うまく使い分ける必要がある。すなわち、品質変動に対する要求がきびしい材料では、ウェブ保温で対処し、逆にきびしくなければ効率をあまり阻害しないフランジ水冷で対処すべきである。また、当然のことながら、仕上げ圧延の前工程での処理（フランジ水冷あるいはウェブ鏡保温）も同時に行い、フランジとウェブの仕上げ温度差を小さくして仕上げ圧延後の処理時間を短くし、工程効率をできるだけ落とさないようにするべきである。

6. 結 言

圧延H形鋼の残留応力軽減法として有力であると考えられる圧延後のウェブ断熱材保温およびフランジ水冷について、相変態を考慮した熱応力計算法を用いて、種々の仕上げ温度条件のもとでの処理時間と残留応力との関係について検討を行った。その結果、次のことが明らかとなった。

(1) 熱応力の冷却過程での変化は、ウェブ保温あるいはフランジ水冷の処理時間にかかわらず、フランジでは引張り→圧縮→引張り、ウェブでは逆に圧縮→引張り→圧縮となる。しかし、冷却過程での熱応力の極大、極小値とその発生時期は処理時間の影響を受ける。

(2) 残留応力分布は、ウェブ保温あるいはフランジ水冷の処理時間および仕上げ温度差の大小にかかわらず、同一形態を示す。すなわち、フランジが引張り、ウェブが圧縮応力で、中央部で大きく端部で小さくなっていき、フランジ先端では圧縮、ウェブのR部近傍では引張応力である。

(3) ウェブ保温およびフランジ水冷の処理時間が長いほど、仕上げ温度差が小さいほど、フランジ部の引張

り、ウェブ部の圧縮残留応力は小さくなり、全体的に残留応力は軽減する。

(4) 残留応力およびウェブ波で問題になりやすい大形H形鋼の代表的サイズである $H: 900 \times 300 \times 16 \times 28$ のウェブ中央部の残留応力を 15 kgf/mm^2 以下にするためのそれぞれの仕上げ圧延後からの処理時間は次のとおりである。

(a) ウェブ断熱材保温の場合

CASE 1 ($T_{fo}=900^\circ\text{C}$, $T_{wo}=700^\circ\text{C}$) \rightarrow 7.5 min

CASE 2 ($T_{fo}=900^\circ\text{C}$, $T_{wo}=750^\circ\text{C}$) \rightarrow 4 min

CASE 3 ($T_{fo}=800^\circ\text{C}$, $T_{wo}=700^\circ\text{C}$) \rightarrow 2 min

(b) フランジ水冷 (水冷熱伝達率 $250 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$) の場合

CASE 1 \rightarrow 2 min

CASE 2 \rightarrow 1 min

CASE 3 \rightarrow 0.5 min

すなわち、残留応力軽減のためのフランジ水冷の処理時間はウェブ保温のその約 1/4 である。

(5) 仕上げ圧延の前工程での処理 (フランジ水冷あるいはウェブ鏡保温) による仕上げ温度差制御と仕上げ圧延後のフランジ水冷あるいはウェブ断熱材保温による冷却速度差制御とを組み合わせることにより、残留応力

値を設定目標値以下に制御できる。ただし、仕上げ圧延後のフランジ水冷とウェブ断熱材保温の選択は、残留応力の軽減効果の面からだけでなく、強度、伸びなどの材質への影響や、制御のやりやすさも考慮して決定されるべきである。

文 献

- 1) 中内一郎, 市之瀬弘之, 義之鷹雄, 森岡清孝: 鉄と鋼, 67 (1981) 13, S 1043
- 2) 吉田 博, 佐々木徹, 近藤信行: 鉄と鋼, 63 (1977) 11, S 736
- 3) 日下部俊, 三原 豊: 鉄と鋼, 65 (1979) 9, p. 1383
- 4) 吉田 博, 佐々木徹, 近藤信行, 田中智夫, 橋本隆文: 鉄と鋼, 69 (1983) 3, p. 412
- 5) 吉田 博, 佐々木徹, 田中智夫, 広瀬勇次: 鉄と鋼, 68 (1982) 8, p. 965
- 6) G. BIRKHOFF and R. S. VARGA: Trans. Am. Math. Soc., 92 (1959), p. 13
- 7) G. D. SMITH 著, 藤川洋一郎訳: 偏微分方程式の解法 (1970), p. 42 [サイエンス社]
- 8) 伊藤 庸, 坂元祥郎, 佐伯真事, 斎藤吉弘, 滝沢昇一, 東野健夫: 鉄と鋼, 64 (1978) 11, S 806
- 9) 伊藤 庸, 坂元祥郎, 佐伯真事, 船越督己, 荻野泰司, 斎藤吉弘, 東野健夫, 青柳伸男: 鉄と鋼, 65 (1979) 8, A 185
- 10) E. SCHEIL: Arch. Eisenhüttenwes., 8 (1935) 12, p. 565