

論 文

UDC 621.771.261 : 539.4.014

圧延H形鋼の残留応力の抑制と制御*

日下部 俊**・三原 豊***

Control of Residual Stresses in Hot-Rolled H-shapes

Takashi KUSAKABE and Yutaka MIHARA

Synopsis:

(1) Residual stresses in Hot-rolled H-shape are caused by the inhomogeneity of thermal distribution. Especially, temperature difference between web and flanges during cooling are important factors. Therefore, following methods are found to be effective to control and reduce the magnitude of residual stresses.

- (a) Forced cooling on the outside surfaces of flanges during cooling.
- (b) Cooling on cooling bed keeping the web vertical or flange horizontal.
- (c) Heating of the web after cooling.

(2) Destructive and non-destructive methods are applied to measure the residual stress distribution. The measured residual stresses on the flanges have different distribution depending on the measuring methods but have similar distributions on webs.

This is mainly due to the different measurable depth of each methods. X-ray and magnetic methods, for example, measure the mean stresses only in the thin layer of the surface.

In order to get the stable measurement to monitor and control residual stresses non-destructively it is desirable to measure on the web.

1. 緒 言

圧延H形鋼は、その断面性能を向上させるため、ウェーブ板厚 t_1 はフランジ板厚 t_2 に比べて小さく、特に残留応力が問題となる大形シリーズ (700×300, 800×300, 900×300) では、 t_1/t_2 は 0.5~0.66 の範囲にある。この結果、圧延、冷却段階において熱容量および熱放散の度合に差を生じさせフランジ、ウェーブ部との間に温度差が現れ、必然的に熱応力を誘起させる^{1)~3)}。この熱応力が、最終的に部材内部に残留応力となつて蓄積される⁴⁾。したがつて、残留応力を抑制、制御するためには、フランジ、ウェーブ間の温度差を極力小さくすることが必要となる。しかしこの場合、圧延終了近辺から冷却完了までの温度差だけを問題にすればよい。この理由は、圧延段階では部材各部はいずれも再結晶温度以上にあるため、材料の降伏応力が低く、たとえ存在しても無視できるためである。冷却段階では再結晶による内部応力の緩和はもはや期待することはできなく、時には常温において、降伏応力に達することがある。そして、残

留応力の発生のみならず、極端な場合には冷却終点付近でウェーブを座屈させ、製品形状を著しく阻害することがある。一方、溶接によつて製造される形鋼 (T, L, H, 形鋼) は、フランジ、ウェーブの組み合わせは広汎にでき、薄肉のウェーブを有する形鋼については、圧延製品のおよばない領域が存在する。これは形鋼圧延技術もさることながら、温度差による熱応力問題が解決されないためである。もしこの問題が解決されるならば、熱間圧延製品範囲はさらに拡大することであろう。

本報告は圧延形鋼残留応力を熱的に制御することを内容としたものだが、工業的に成立できる方法を念頭において検討した。なお残留応力制御効果と初期分布形態を把握するために測定法もあわせ述べる。

2. 残留応力の制御

2.1 フランジ強制冷却法

すでに述べたとおり、圧延H形鋼の残留応力発生原因は、冷却時に発生する温度の不均一にある。たとえば、一般のH形鋼のように、フランジ板厚がウェーブ板厚に

* 昭和 52 年 7 月 31 日受付 (Received July 31, 1978)

** 日本鋼管(株)技術研究所 (現: 鉄鋼技術部) (Technical Research Center, Nippon Kokan K. K., Now Iron and Steel Technology Department 1-1-2 Marunouchi Chiyoda-ku 100)

*** 日本鋼管(株)技術研究所 (Technical Research Center, Nippon Kokan K. K.)

くらべ大きい場合、フランジ部温度がウェーブ部温度に
くらべ高温となつている。そこで残留応力を減少させる
ためには、フランジ部を強制冷却し、温度不均一を減少
すればよいものと思われる。強制冷却法のなかで、ミス
ト・クールは広範囲に熱伝達係数を変えることができ
($H=20\text{cal/cm}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} \sim 1500\text{cal/cm}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$) 冷却温
度をコントロールするには都合のよい方法である。ここ
ではミスト・クール中⁵⁾ 比較的容易に得られる熱伝達係
数 $H=30\text{cal/cm}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ の場合をもちい計算した。

2.1.1 強制冷却

初期温度が、フランジ温度 $UF=870^\circ\text{C}$ ウェーブ温度
 $UW=670^\circ\text{C}$ の $912 \times 302 \times 18/34$, H 形鋼の冷却過程に
おいて、フランジ外面を強制冷却し、全体が室温になつ
た時の残留応力を計算した。Fig. 1 にこの場合の冷
却曲線を示す。図中一点鎖線が室温まで強制冷却した
場合の結果である。すなわち初期に 200°C の温度差
(T_1-T_3) があつたものが、約 6 min で温度差はなくな
り、以後もフランジ部の冷却が速いため、フランジ中央
部温度 T_1 とウェーブ中央部温度 T_3 の差 (T_1-T_3) は
さらに減じ -200°C の極小値を有したのち室温にいた
つており、自然空冷の場合と対称的な変化を示してい
る。Fig. 2 にこの場合発生する残留応力分布を△印に示
す。図に見られるとおり、フランジ部には圧縮の、ま
た、ウェーブ部には引張りの残留応力が発生しており、
自然空冷の場合とは全く逆の分布になつている。これは
冷却が強すぎたためと考えられる。

2.1.2 フィード・バック法

そこで (T_1-T_3) を制御し、これを $\pm 15^\circ\text{C}$ の範囲内
に収めるよう間けつ的に強制冷却を行つた場合につき、
シミュレーション計算を行つた。なお、計算に用いた初期
温度、冷却条件はさきと同様である。この場合の冷却

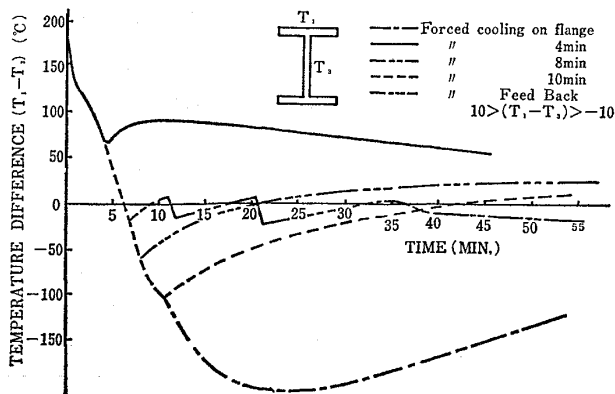


Fig. 1. Cooling curves when forced cooling is applied the outside surface of the flanges ($912 \times 302 \times 18/34$).

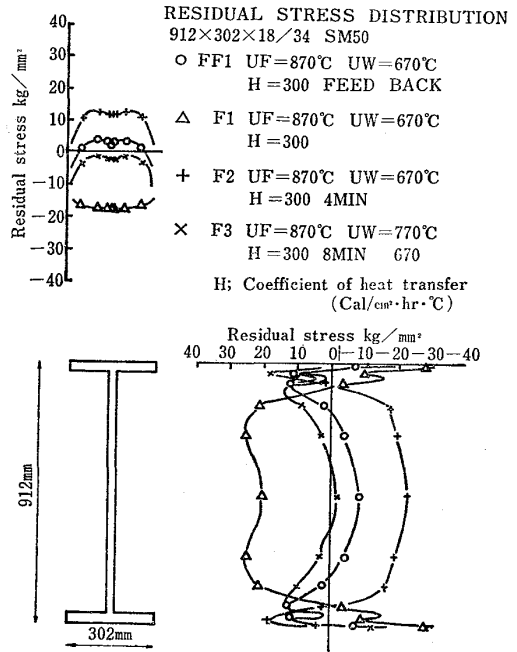


Fig. 2. Calculated residual stress distribution when forced cooling is applied to the outside surface of the flange ($912 \times 302 \times 18/34$). Initial temperature $UF 870^\circ\text{C}$, $UW=670^\circ\text{C}$.

曲線を Fig. 1 の 3 点鎖線により示す。すなわち最初
(T_1-T_3) が -15°C をこえるところで強制冷却が停止
される。そして空冷となつた場合、逆にウェーブの冷却
速度が増加し (T_1-T_3) の値は増加するが、(T_1-T_3)
が $+15^\circ\text{C}$ をこえるところで再度フランジ外面の強制冷
却が開始されている。このようなオン・オフ動作を数回
繰り返し、室温にいたつている。Fig. 2 にこの場合の残
留応力分布を○印で示す。

図でみられるとおり、ウェーブ中央で -10kg/mm^2 、
フランジは数 kg/mm^2 、以内の残留応力値となつてい
る。この分布形状は空冷の場合に類似しているが、その
値は非常に小さい。このようにフランジ外面強制冷却法
は、残留応力軽減に有効である。

2.1.3 フィード・フォワード法

フィード・バック法を実用に供するためには、冷却過
程全体をつうじ、フランジ部とウェーブ部の温度を常に
測定し、この差を強制冷却バルブにフィード・バックす
る必要がある。しかし、用いられる測温センサーは取り
つけ位置に制約があり、精度面、保守上の問題があり、
実用上困難な点が多い。したがって、このような困難を
取り除くため初期に一度だけ強制冷却を行い、強制冷却
時間を調整することにより、フィード・バック法と同じ
効果が得られるものと考え検討を加えた。Fig. 2 に強制

冷却が4 min(+印), 8 min(×印) の場合と残留応力分布を示す。図に見られるとおり, 4 min 冷却の場合は, 自然空冷の場合と同一の傾向を示し, その残留応力値も少し減少するのみであり, 冷却時間が短かすぎたためと思われる。つぎに8 min 冷却の場合には, ウェーブ中央部で約 -2kg/mm^2 , フランジ中央部でも約 2kg/mm^2 , の残留応力値となつている。このように8 min 冷却の場合には発生する残留応力値が非常に小さくなつており, 適当な冷却時間さえ選べれば, 残留応力を大幅に減少させることが可能である。

なお, 初期温度が変われば最適強制冷却時間が変わるものと思われる。それゆえ, 初期温度として $UF=870^\circ\text{C}$, $UW=670^\circ\text{C}$ のほかに $UF=930^\circ\text{C}$, $UW=730^\circ\text{C}$ の場合について計算した。Fig. 3 は, 図に示されるとおり初期温度が異なれば, 最適の強制時間は初期温度が $UF=870^\circ\text{C}$, $UW=670^\circ\text{C}$ の場合と変わり, 約6.55min となつている。つぎにフランジを強制冷却する場合, 計算では一定の熱伝達係数 $H(30\text{cal/cm}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ で与えたが, 実際問題として, H を一定とする冷却条件は実現困難であり, 当然のことながら, ある分布をもつことが予想される。Fig. 4 に H の分布を仮定して, 残留応力分布を計算した。図中○印は山形分布であり, △印はほう物線分布, +印は二重ほう物線分布を示す。このとき, 山形, ほう物線分布のいずれもフランジ中央で

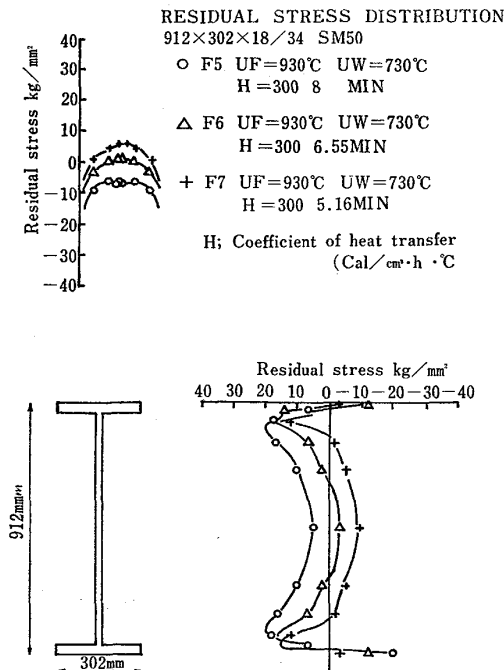


Fig. 3. Calculated residual stress distribution in forced cooling of wide flange beam, initial temperature: $UF=930^\circ\text{C}$, $UW=730^\circ\text{C}$.

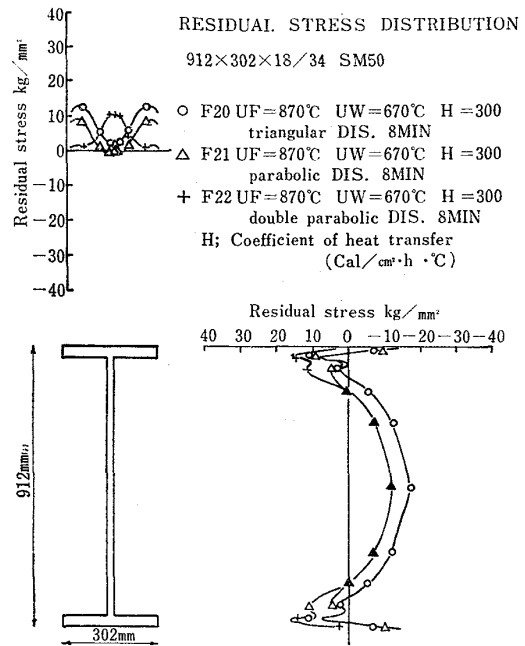


Fig. 4. Influence of heat transfer coefficient on residual stress cooled from the initial temperature in flange (UF) 870°C and web (UW) 670°C .

の H は $30\text{cal/cm}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ とし, フランジ端部ではその半分の $15\text{cal/cm}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ とした。端部, 中央部に極小値 ($15\text{cal/cm}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$) なお二重ほう物線分布の場合値合は, フランジの4等分点上の2ヶ所に H の極大 ($30\text{cal/cm}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$), をもつようなほう物線分布を仮定した。図からわかるように, フランジ部の残留応力は複雑な分布形状を生じるが, フランジの全体の冷却能が低下するため, 8 min の強制冷却を行つても残留応力を十分に減少させることはできない。それゆえ, この方法を実用に供するためには, 圧延最終パス前, またはあとに測温するとともに, あらかじめ十分に H の分布を実測値をもとにして解析しておかなければならない。そして, これらの条件を総合的に把握した上で最適条件を選び, 強制冷却時間設定へとフィード・フォワードする必要がある。

2.1.4 強制空冷実験結果

実験は $912 \times 302 \times 18/34\text{H}$ 形鋼を 850°C 均一状態に加熱し, フランジの外面に圧縮空気を吹きつけ強制空冷を行つた。

残留応力はコンタクト・ゲージ法を用い測定した。Fig. 5 に自然空冷した場合と, 強制空冷した場合とフランジ, ウェーブにおける残留応力分布を示す。図に示されるように, 強制空冷○印の残留応力分布は自然空冷●印の場合に比べて小さいが十分に減少していない。これ

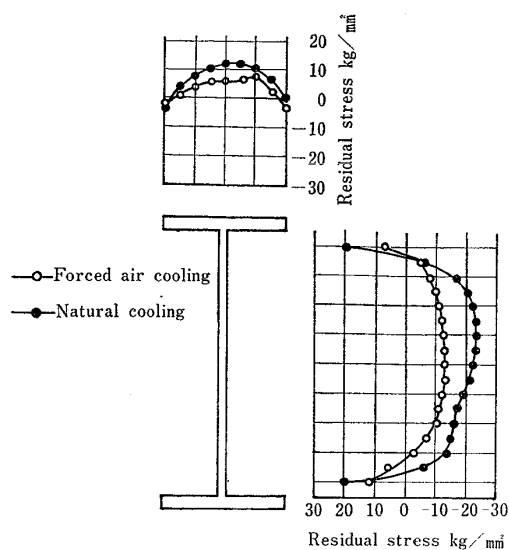


Fig. 5. Residual stress distribution when forced air cooling is applied to the outside surface of flange (912×302×18/34).

は強制空冷では冷却が不十分なことを示すものと考えられる。

2.2 冷却姿勢による残留応力の軽減

H形鋼の冷却床における冷却姿勢の違いにより、フランジ、ウェーブの冷却速度に差の生じることはよく知られた事実である²⁾³⁾。たとえば HH のごとく並べた場合、隣接したフランジ部の熱放射が妨げられ、冷却速度はおそくなる。また HH のごとく並べた場合、ウェーブ部から熱放射が妨げられウェーブ部の冷却速度はおそくなる。これらの現象より冷却姿勢の差により残留応力値に差の生じることは容易に推定できる。ここでは HH 方向 (間隔 1 m) に並べた場合と HH 方向 (間隔 1 m) に並べた場合に発生する残留応力を計算により求めた。計算にあたっては相対位置の関係による熱放射条件をラポートの余弦法により求め、対流条件は⁶⁾

$$\text{垂直部分に対して上面は, } hc = 1.13 \times (\theta/e)^{0.25}$$

ここで e , 側面長さ θ , 温度差 ($T_S - T_R$)

T_S , 温度表面 T_R , 室温 hc , 対流による熱伝係数, 下面は, $hc = 0.5 \times (\theta/e)^{0.25}$

$$\text{水平部分に対して } hc = 1.17 \times (\theta/e)$$

として計算した。Fig. 6 に示すごとく、HH 方向に並べた場合、ウェーブで平均温度とフランジ平均温度の差 ΔT は HH 方向に並べた場合にくらべ少なく、また、残留応力も HH 方向に並べた場合、ウェーブ中央で約 13kg/mm²、HH に並べた場合、約 18kg/mm² と、Fig. 7 のごとく HH 方向に並べた方が少なくなっていることがわかる。この結果は従来よりいわれているように冷却床で HH 方向に並べた場合、冷却歪により特に

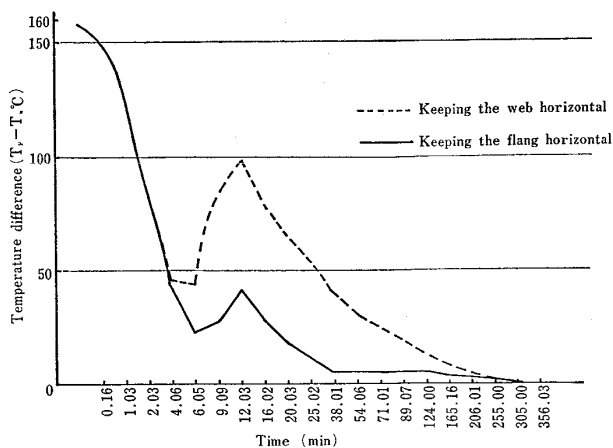


Fig. 6. Variation of temperature-difference ($T_{\text{fringe}} - T_{\text{web}}$) during cooling in different cooling array. (912×302×18/34).

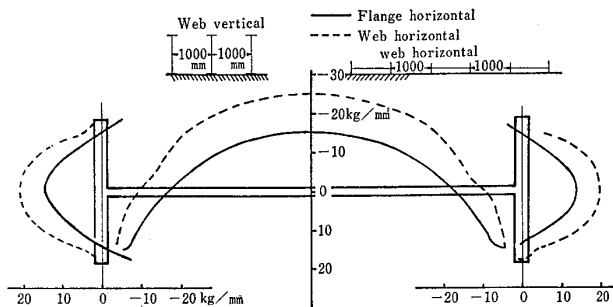


Fig. 7. Calculated residual stress in hot rolled H-beams (912×302×18/34).

大形H形鋼については、ウェーブ波の発生することを裏づけるものと考えられる。なお、コンタクト・ゲージによる実測値を Fig. 8 に示したが、Fig. 7 の計算結果とよい一致を示している。

2.3 ウェーブ加熱による残留応力の軽減

鋼材を部分的に加熱した場合、あるいは溶接した場合、その部分は引張りの残留応力が発生することがよく知られていることである。それゆえ、この残留応力を既存の圧縮残留応力に重畳させることにより、初期の圧縮残留応力を軽減できるものと考えられる。実験はウェーブ中央に -32kg/mm² の残留応力値をもつ形鋼 (912×302×18/34) のウェーブをアセチレン-酸素ガスを用いて加熱した場合であり、加熱温度は 750°C と 400°C での条件下で実験を行った。1 ウェーブ中央を 1 条、高温にて加熱 (750°C)

2. ウェーブ中央を 3 条、高温にて加熱 (750°C)
 3. ウェーブ中央を 3 条、低温にて加熱 (400°C)
 4. ウェーブ中央を 7 条、低温にて加熱 (200°C)
- (ウェーブ上面 4 条, ウェーブ下面 3 条)

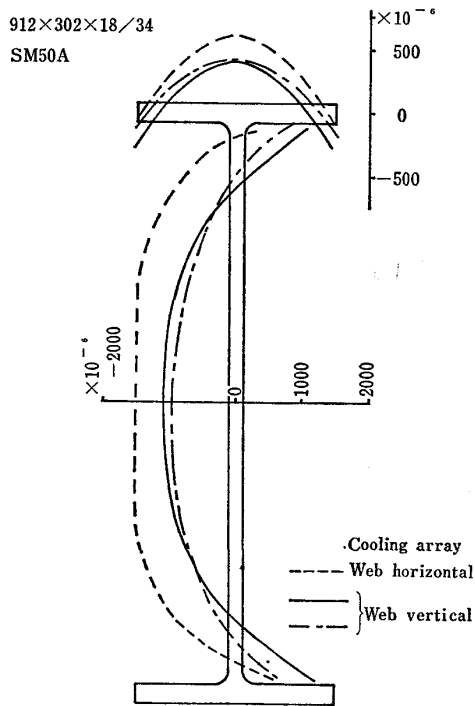


Fig. 8. Measured results of residual strain by contact gauge.

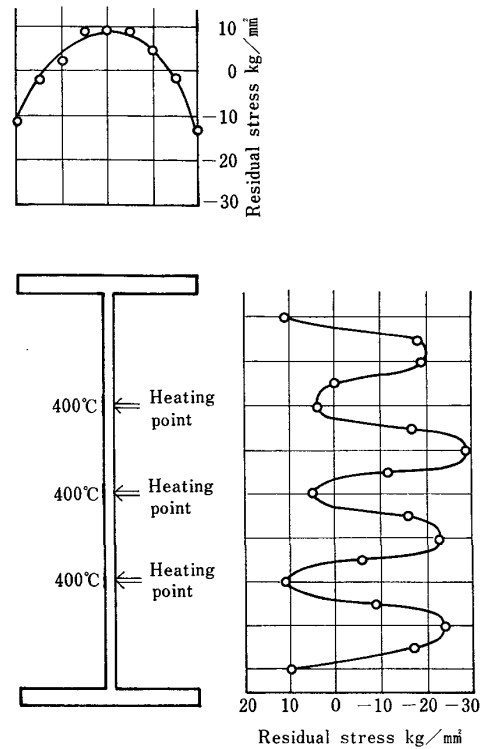


Fig. 10. Residual stress distribution when the web is heated at a low temperature on (400°C) three lines (912×302×18/34).

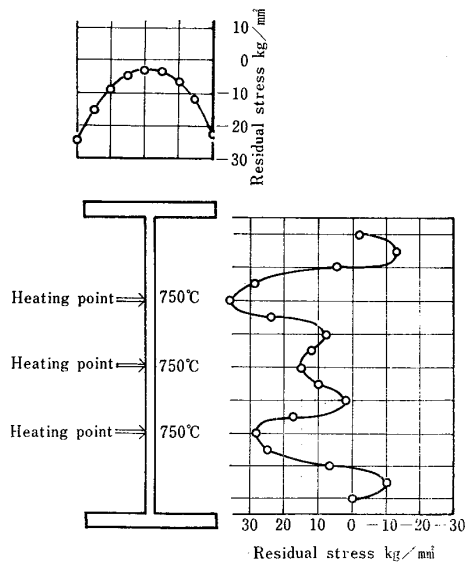


Fig. 9. Residual stress distribution when the web is heated at a high temperature (750°C) on three lines (912×302×18/34).

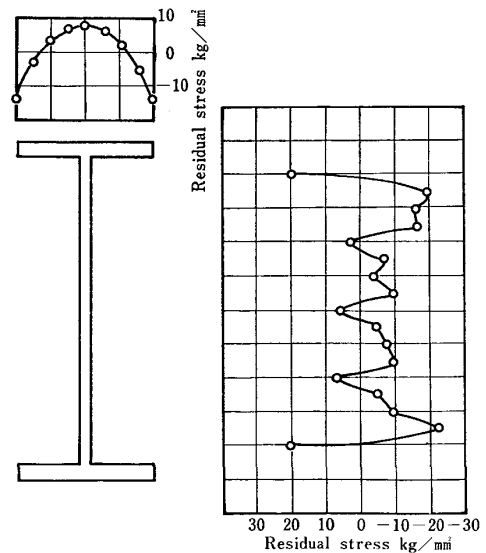


Fig. 11. Residual stress distribution when the web is heated at low temperature (200°C) on seven lines (912×302×18/34).

Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11 に 3 条件による結果を示す。図にあきらかなように、750°C で 3 条加熱した場合、加熱点には大きなプラスの残留応力が存在しこのましくない。いつぼう、400°C で 3 条加熱した場合は、750°C で 3 条加熱した場合にくらべ加熱による残留応力は小さくなると同時に、フランジ部の残留応力は減少している。また、Fig. 11 の結果から条数が多くなるほ

ど、残留歪の凹凸も小さくなりこのましい傾向にある。できればウェーブ全体をいちように熱することがこのましいといった結果が得られている。たとえば、工場設備として適用する方法とすれば、電磁誘導加熱法（周波数 1 kHz ていど）をポスト・アニラー的に使用すれば能率的であり、きわめて精度よい加熱制御が可能となるであ

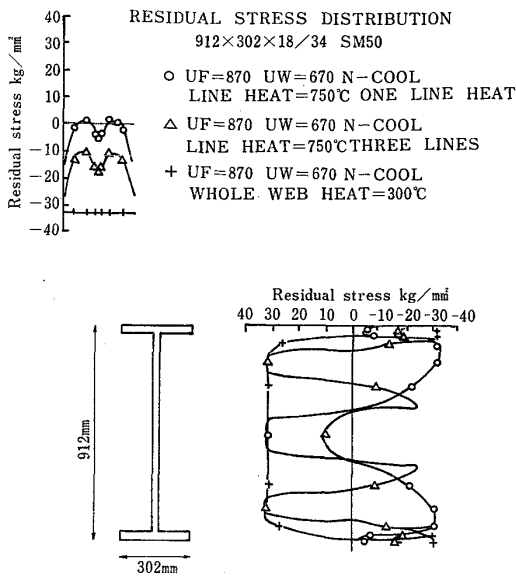


Fig. 12. Calculated residual stress distribution created after web-heating.

ろう。つぎに計算により同様のことを確かめた。その結果を Fig. 12 に示す。計算時の初期残留応力分布は線状加熱実験に供されたH形鋼の値を用いた。図中、1条3条、加熱の場合は加熱温度を 750°C と選んだ。この結果は実験と同一結果である。また、ウェーブ全体を 300°C に加熱した場合を計算したが、この場合ウェーブは 32kg/mm²、フランジ -32kg/mm²、となっており初期の残留応力分布と全く逆になっている。このことはウェーブ全体を加熱する場合には、300°C に加熱するだけでも加熱温度が高すぎることを示すものと考えられ、最適加熱温度は 300°C 以下のところにあるものと考えられる。したがって、電磁誘導加熱法を用いる時は、加熱電力も少なく設備費も妥当な値となろう。

3. 残留応力の測定法と測定結果

残留応力を測定するには、材料内部の応力場を直接、あるいは間接的に測定するものであるが、外部から荷重を加えた場合のように簡単ではない。残留応力測定方法には大別してつぎの2とおりがあ

- (1) 非破壊法……内部応力場を直接に測定する。
- (2) 破壊法……内部応力の解放を行い、その時に発生する歪から残留応力を知る。

本報告の実験では主に用いた方法は、破壊法の一つであるコンタクト・ゲージ法である。しかし、製品管理の上から非破壊的に残留応力を測定することが望まれているため、非破壊応力測定の一つである X 線応力測定法と、磁気歪測定法とを用いて残留応力を測定し、これら測定法がH形鋼の残留応力の工場管理法として使用でき

る可能性について検討した。

3.1 コンタクト・ゲージによる方法 (機械式歪計)

この方法は構造物の応力測定などに広く用いられており、非常に簡単な方法である。測定する手順は

- (1) 試料の2点 (100mm 間隔) に鋼球を打ち込み、この距離 (a_0) を正確に (1μ の精度) で測定する。
- (2) 試料を切断し内部応力を解放したのち、再度2球間の距離 (a) を測定する。

(3) $(a-a_0)/a_0$ により応力解放時に解放された歪を知り、素材に存在していた残留応力を知る。この測定に用いた歪計はドイツの Frits・Staeger 社製であり、同一点における鋼球間の距離のばらつきは $\max \pm 3\mu$ 程度 (30μ Strain) である。この方法による 912×302×18/34 H形鋼の残留応力測定結果の一例を Fig. 13 に示す図にみられるとおり、フランジには引張り (中央点で約 10kg/mm²) の、また、ウェーブには圧縮の (中央点で約 20kg/mm²) 残留応力の存在していることがわかる。なお、測定にあたっては、フランジ部に9点 (30mm 間隔)、ウェーブに17点 (50mm 間隔) の測定点をとった。

3.2 X線残留応力測定法

X線応力測定法は、(1)非破壊的に材料の応力測定が可能なこと。(2)微小部分の応力測定が可能なこと。などの利点があるため広く研究されている。

この方法は金属結晶によるX線の回折現象を利用した

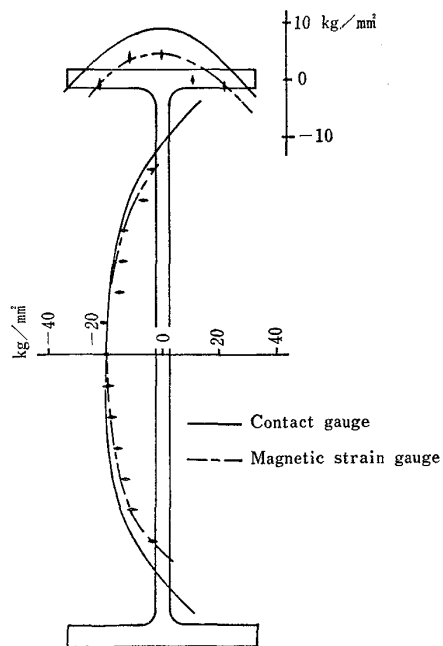


Fig. 13. Values of residual stresses measured by contact gauge and magnetic strain gauge (912×302×18/34).

ものであり、直接に金属格子面間隔の変化を測定し、素材の内部歪を知る方法である。しかし、測定される歪はX線の浸透深さ(約 50μ)内の平均歪であり、ごく表面層の歪に限定される。このため板厚方向に大きな残留応力分布がある時は、その測定値に対し注意を要する。測定は、(1)表面層の黒皮部をグラインダーで除去したのち、(2)グラインダーによる加工層(約 100μ)を電解研磨で除去し、(3)X線装置をセットし、回折強度曲線を測定する。(4)この曲線のピーク角度(回折角度)の変化により内部歪を知る。……このような手順をとるが熱的に導入される残留応力測定の場合は、一般に金属結晶の完全性が失われていないので回折ピークは明りようである。こうして測定された $600\times 200\times 11/17$ mm H形鋼の残留応力を Fig. 14 に示す。なお、図に比較のためコンタクト・ゲージによる測定結果(○印)を合わせ示した。これからわかるとおり、ウェーブでは両測定結果と一致するが、フランジでは両者の結果がまったく一致しない。これはウェーブにおいては板厚方向に残留応力値があまり変化しないのにくらべ、フランジにおいてこの変化が大きく、表層と内部の応力が相当に異なっているためと考えられる。このような応力分布の傾向は、理論計算による結果においても確かめられた。とくにジャンボHなどは典型的な例である。

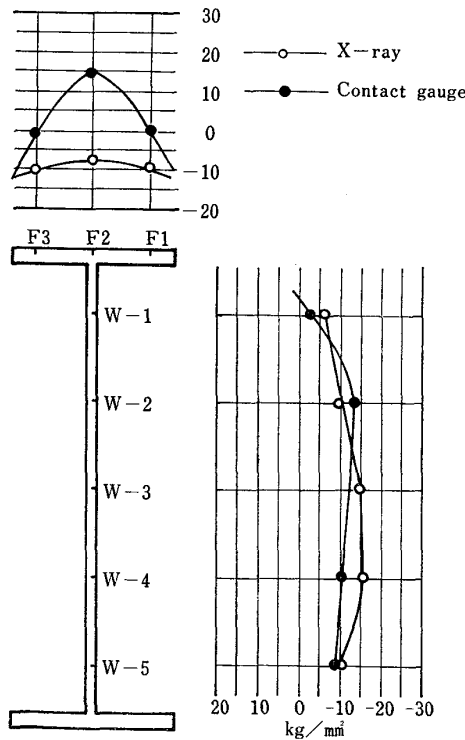


Fig. 14. Measured results of residual stress in $600\times 200\times 11/17$ H-section by X-ray and contact gauge.

3.3 磁気歪計

磁気歪計は鉄などの強磁性体金属に磁気をかければ歪が生じ、歪を負荷すればその透磁率が変化する“磁気歪効果”と呼ばれる現象を利用したものである。すなわち残留歪を測定するかわりに透磁率の変化の程度を測定し、内部歪を知るものである。使用する測定器は Fig. 15 にみられる 50Hz の交流ブリッジ回路により、透磁率の変化をインピーダンスの変化として測定するものである⁹⁾。歪測定に先立ち、この計器によるブリッジ電流の変化と歪の関係を一軸引張圧縮により校正した。そこで、この測定器を用い $912\times 302\times 18/34$ mm H形鋼の残留応力分布を測定した。その結果を Fig. 13 に合わせ示す。図にみられるとおり、ウェーブの中央において -18kg/mm^2 程度の残留応力の存在が認められ、コンタクト・ゲージによる結果とほぼ一致している。なお、図中矢印の範囲は同一点における5回の測定値のばらつきを示したものである。いつぼうフランジにおける残留応力は両者の分布に大きなへだたりがあり、板厚方向応力分布の影響と思われる。なお、測定においては、プローブを押しあてる表面の凹凸仕上げ精度が、プローブのコイルのインピーダンスを大きく左右するため、均一な仕上げと平面度を得るように研磨する必要がある。また、厳密には部材の成分、組織、に透磁率が影響されるため、材質が変わった時は、あらたに校正する必要がある。以上コンタクト・ゲージ法、X線法、および磁気歪法を用いてH形鋼の残留応力を測定したが、これら測定値を比較した場合、板厚方向に残留応力分布の著しいフランジ部においては、これらの測定法による結果は一致しない。しかし、板厚方向に残留応力値の変化が少ないウェーブにおいては、これら3つの測定値はよく一致す

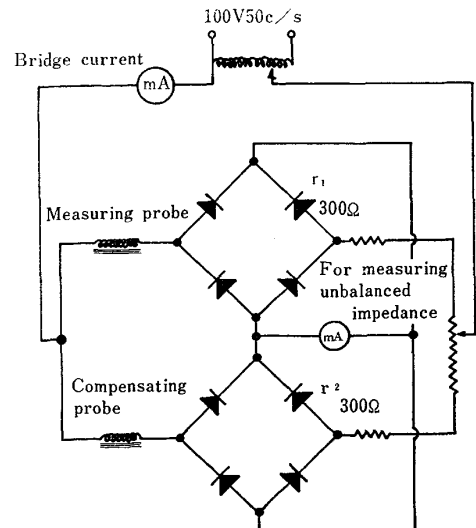


Fig. 15. Magnetic stress tester circuit.

ることがわかった。それゆえ、非破壊測定法として残留応力を測定する場合、測定法によらず安定した結果を与えるウェーブ中央の残留応力を測定することが望ましいものと思われる。工場管理計器としては、この二つの非破壊測定法は有望であり、とくに装置の簡略さ、コストの点から磁気歪法は期待できる。

4. 結 言

圧延H形鋼の残留応力を熱的に制御するためには、以下の方法が実用性があることがわかった。

(1) 圧延最終パス前、後および冷却過程においてフランジ外面を強制冷却する方法をとるが、強制冷却条件は、H形鋼のフランジ、ウェーブの初期温度、冷却時期、時間と熱伝達係数 H 、および分布形状に支配され、これらの組み合わせが最適化されて初めて残留応力の抑制効果があらわれる。

(2) 冷却床におけるH形鋼の冷却姿勢は、H姿勢よりは、 \square 姿勢に置くことが望ましく、とくに細幅条列では \square 姿勢で、しかも、密に配列することが要求される。これはウェーブの熱放射が隣接するウェーブの熱により抑制されるためである。

(3) オンラインでは、ウェーブ部を加熱する。この時は比較的低い温度 (200~300°C) でウェーブ全体を加

熱することが効果的である。ただし、最適温度範囲はさまく、加熱温度が高いと残留応力分布は逆転する。

(4) 残留応力の測定法として、応力解放をともなう方法 (機械的歪計) と非破壊的方法 (X線, 磁気歪計) を用いたが、板厚内残留応力分布が急しゆんな場合は両者の測定値は一致しないけれども、平坦な場合はよく一致する。したがって、後者の測定法を用いる場合には表層の応力のみが測定されるためウェーブ部の測定に限るがよい。

文 献

- 1) 日下部俊, 三原 豊: 塑性加工シンポジウム (1972), p. 61
- 2) *I. N. FILIPOV and I. V. GUNIN*: "Waviness in the webs of lightered beams" *Stal' 10* (1963), p. 193
- 3) *J. B. LEAN*: *Trans, ISIJ*, 11 (1971), p. 733
- 4) 日下部俊, 三原 豊: 鉄と鋼, 65 (1979) 9, p. 1375
- 5) 国岡計夫, 野口孝男: 鉄と鋼, 62 (1976), p. A45
- 6) ギード著 横堀進他訳「基礎伝熱工学」(1959), p. 191 [丸善株式会社]
- 7) 「X線残留応力測定法」日本材料学会編 (1966), p. 84 [養賢堂]
- 8) 「工業計測ハンドブック」内藤 正編 (1970), p. 134 [朝倉書店]