
H 形鋼の外法寸法制御技術の開発

Development of Rolling Techniques to Control Outer Dimensions of H-Shapes

林 宏之(Hiroyuki Hayashi) 鍵田 征雄(Ikuo Yarita) 斎藤 晋三(Shinzo Saito) 藤本
洋二(Yoji Fujimoto) 河村 有秀(Arihide Kawamura) 竹林 克浩(Katsuhiro
Takebayashi)

要旨：

従来の圧延 H 形鋼では圧延中のロール寸法が固定であることから内法が一定であったが、建築施工性の観点から外法一定であることが要望されていた。このため溶接 H 形鋼と同等の外法一定 H 形鋼を熱間圧延工程で製造するための新圧延技術を開発した。フランジ厚さが変化してもウェブ高さを一定に保つための寸法制御は、モデル実験からユニバーサル圧延機によるウェブ内幅の縮小圧延を行うことで可能であることがわかった。本圧延法ではウェブ内幅縮小圧延時に問題となるウェブ板厚段差、ウェブの座屈および中心偏りを防止することができる。またフランジ幅制御はモデル実験からカリバレスエッジヤの設置により可能であることを見いだした。実機適用の結果、ウェブ高さは全長にわたり良好な寸法精度が得られ、中心偏りとフランジ幅精度も従来と同等のものが得られた。これらの技術により新 H 形鋼の製造が可能になり、さらに形鋼圧延分野の長年の課題であるサイズフリー圧延を実現することができた。

Synopsis：

In the conventional universal rolling of H-shapes, the inner dimensions are fixed due to the constancy of roll dimensions during rolling. From the viewpoint of on-site productivity of construction works, H-shapes produced by rolling with fixed outer dimensions have been strongly required. New techniques of hot steel rolling of H-shapes have been developed to produce H-shapes with high quality as welded H-shapes. By using an experimental model mill, it has been found that a web width reducing method by universal mill can keep the web depth constant with different flange thickness to control an outer dimension of web depth. In this rolling method, it is possible to prevent an occurrence of web buckling, web off-center and nonuniformity of web thickness which are the main problems in web width reduction. It has been also found through model rolling experiments that grooveless edger rolling is effective in controlling a flange width which is another outer dimension. These techniques have been applied to actual production and the same quality of web off-center and flange width as those of conventional products are obtained. These techniques have been able to produce a new

type H-shape and also to realize a schedule-free rolling of H-shapes which is a main subject in the field of shape rolling.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Development of Rolling Techniques to Control Outer Dimensions of H-Shapes



林 宏之
Hiroyuki Hayashi
技術研究本部 加工制御研究センター 主任研究員(課長)



鎌田 征雄
Ikuo Yarita
技術研究本部 加工制御研究センター 主任研究員(部長補)



斎藤 晋三
Shinzo Saito
水島製鉄所 条鋼圧延部条鋼技術室 主査(課長補)



藤本 洋二
Yoji Fujimoto
水島製鉄所 条鋼圧延部条鋼技術室 主査(掛長)



河村 有秀
Arihide Kawamura
水島製鉄所 条鋼圧延部条鋼技術室 主査(掛長)



竹林 克浩
Katsuhiro Takebayashi
(株)レオテック 研究部 (掛長)

1 緒 言

従来のH形鋼のユニバーサル圧延では、設備上の制約からウェブ高さ、フランジ幅などの外法寸法がフランジ厚、ウェブ厚に応じて変化し、いわゆる内法一定であった。しかし、近年需要が大幅に増加している建築構造物の梁接合などでは外法一定の方が施工性が良好であり、熱間圧延で製造されるH形鋼も外法一定であることが要望されていた。

ウェブ高さとフランジ幅の両者の外法を同一呼称寸法において一定とするためには、既設圧延工程にこれらの幅寸法を制御する新規機能を導入することが必要である。

当社ではかねてより、これらの外法寸法を制御する圧延技術および設備の開発を行ってきた。それらの結果、ウェブ高さの制御に関してはユニバーサル圧延機によるウェブ内幅縮小圧延法^{1,2)}を、また、フランジ幅の制御に関しては鼓型ロールによるエッジ圧延法^{3,4)}を各々開発し、実用化に成功した。本報告では、これらの圧延技術の開発経緯とその概要を示す。

要旨

従来の圧延H形鋼では圧延中のロール寸法が固定であることから内法が一定であったが、建築施工性の観点から外法一定であることが要望されていた。このため溶接H形鋼と同等の外法一定H形鋼を熱間圧延工程で製造するための新圧延技術を開発した。フランジ厚さが変化してもウェブ高さを一定に保つための寸法制御は、モデル実験からユニバーサル圧延機によるウェブ内幅の縮小圧延を行うことで可能であることがわかった。本圧延法ではウェブ内幅縮小圧延時に問題となるウェブ板厚段差、ウェブの座屈および中心偏りを防止することができる。またフランジ幅制御はモデル実験からカリバレスエッジの設置により可能であることを見いだした。実機適用の結果、ウェブ高さは全長にわたり良好な寸法精度が得られ、中心偏りとフランジ幅精度も従来と同等のものが得られた。これらの技術により新H形鋼の製造が可能になり、さらに形鋼圧延分野の長年の課題であるサイズフリー圧延を実現することができた。

Synopsis:

In the conventional universal rolling of H-shapes, the inner dimensions are fixed due to the constancy of roll dimensions during rolling. From the viewpoint of on-site productivity of construction works, H-shapes produced by rolling with fixed outer dimensions have been strongly required. New techniques of hot steel rolling of H-shapes have been developed to produce H-shapes with high quality as welded H-shapes. By using an experimental model mill, it has been found that a web width reducing method by universal mill can keep the web depth constant with different flange thickness to control an outer dimension of web depth. In this rolling method, it is possible to prevent an occurrence of web buckling, web off-center and nonuniformity of web thickness which are the main problems in web width reduction. It has been also found through model rolling experiments that grooveless edger rolling is effective in controlling a flange width which is another outer dimension. These techniques have been applied to actual production, and the same quality of web off-center and flange width as those of conventional products are obtained. These techniques have been able to produce a new type H-shape and also to realize a schedule-free rolling of H-shapes which is a main subject in the field of shape rolling.

2 ウェブ高さ制御技術

2.1 ウェブ高さ制御の課題

H形鋼のウェブ高さ寸法 H は、Fig. 1 に示すように両側のフラ

* 平成2年10月26日原稿受付

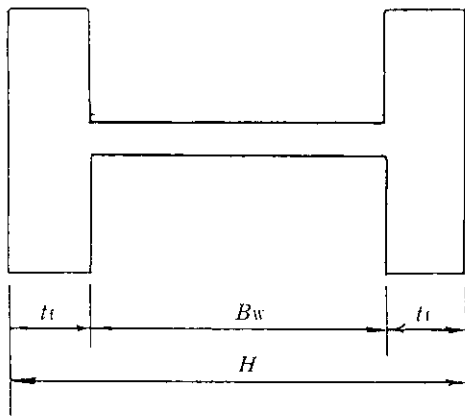


Fig. 1 Relation between web depth and other dimensions of H-beam

ンジ厚 t_f の合計とウェブ内幅 B_w の総和の寸法であり、(1)式のようになる。

$$\text{ウェブ高さ } H = 2 \times \text{フランジ厚 } t_f + \text{ウェブ内幅 } B_w \quad \cdots (1)$$

従来工程ではH形鋼のウェブ内幅 B_w はユニバーサル圧延機の水平ロール幅と同一であるという設備制約から圧延中は一定であり、フランジ厚 t_f は各種のサイズがあるのでウェブ高さ H はフランジの厚さに応じて変化することになる。

ロールを交換することなく、フランジ厚 t_f が異なってもウェブ高さ H が一定のH形鋼を製造するためには、フランジ厚に応じてウェブ内幅寸法 B_w を制御することが必要である。

ウェブ高さ寸法制御技術の開発課題は、このウェブ内幅の制御機能をどのような方式で実際の圧延工程内で実現するかということである。

2.2 圧延方式の検討

ウェブ内幅を制御する方法として大別すると、ウェブ内幅の拡大方法およびウェブ内幅の縮小方法が考えられる。

ウェブ内幅縮小方式は、薄手サイズのウェブ高さを基準寸法として厚手サイズをこれに合致させることになる。このため厚手サイズほど所要変形量が大きくなるが、このとき鋼材温度は薄手サイズに比べて高いことから変形が容易と考え、内幅縮小法を検討した。

ウェブ内幅の縮小圧延方式としては

- ① 縦ロール圧延機による方式
- ② ユニバーサル圧延機による方式

などが考えられるが、いずれの方式でも、ウェブの座屈発生が懸念される。そこで最適な縮小方式を検討するため、鉛を用いたモデル圧延実験を行った⁵⁾。

2.2.1 縦ロール圧延方式

実際のH形鋼の1/6縮尺の純鉛(99.99%)のH形材を押し出しで製造し、Table 1に示す条件で、縦ロール実験圧延機を用いてウェブ内幅の縮小実験を行った。このときFig. 2に示すようにウェブの幅方向中央部を2本または3本の分割ローラを用いてロールセンター位置で拘束した。また幅縮小開始時点の座屈を拘束する効果を確認するため、拘束ローラを入側へ40 mmシフトして圧延を行った。これらの圧延後の断面形状をFig. 3に示す。本図から縦ロールによるウェブ内幅圧下では座屈押さえローラを用いても、幅圧下量が大きい場合はローラの間でウェブが座屈して形状不良が発生し、また入側にローラをシフトして接触開始時点の座屈の発生を防止してもロールセンターでの拘束がない場合は効果がないことがわかる。

Table 1 Experimental conditions for vertical rolling

Material	Pure lead (99.99%)
Roll	S45C
Lubrication	No lubrication
Web inner width	80 mm
Flange width	30 mm
Web thickness	1.5~3.5 mm
Thickness ratio	1.5~2.0
Vertical mill	
Vertical roll	150 mmφ

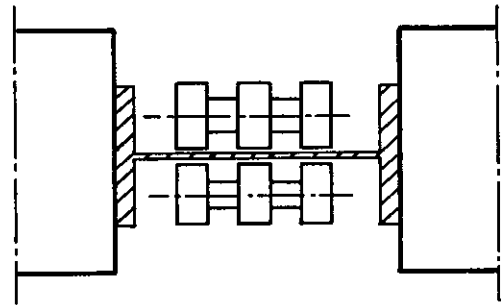


Fig. 2 Reduction method of web inner width by vertical rolling mill

Roller Shift ΔS^*	$\frac{\Delta B_w}{T_w}$	Cross section
2 rollers $\Delta S = 0$ mm	1.5	
3 rollers $\Delta S = 0$ mm	1.5	
3 rollers $\Delta S = 40$ mm	0.75	

* ΔS : Distance from the roll center

10 mm

Fig. 3 Cross sections of H-beam after experimental vertical rolling

圧下後のウェブの座屈高さのウェブ厚に対する比(座屈形状比)とウェブの内幅圧下量のウェブ厚に対する比(幅圧下比)の関係をFig. 4に示す。

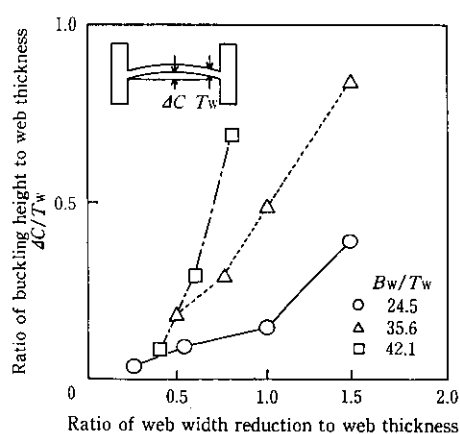


Fig. 4 Relation between buckling shape ratio and web width reduction ratio in the case of vertical rolling

JIS のウェブ曲がりの許容範囲から座屈形状比の限界を 0.2 以下とすると、堅ロール圧延方式では、座屈防止ローラを用いてもとり得る幅圧下比の最大値は約 0.5 である。

すなわち堅ロール圧延方式によりウェブの内幅を変更できるのは、ウェブ厚の 0.5 倍以下であり、堅ロール圧延方式の幅調整機能は十分なものとはいえない。

2.2.2 ユニバーサル圧延方式

堅ロール圧延方式に比較し、ユニバーサル圧延機によるウェブ内幅の縮小圧延では、ウェブの内幅圧下と同時にフランジ厚の圧下を行える点で有利と考えられる。

ユニバーサル圧延機によるウェブ内幅の圧下状況を Fig. 5 に示す。本方式ではフランジ厚の圧下を行うため、インラインで胴幅寸法が変更可能な水平ロールが必要である。

本方式を評価するため Table 2 に示す条件で、幅可変の水平ロールを有するユニバーサル圧延機を用いウェブ内幅の縮小実験を行った。幅可変水平ロールは片側 31 mm の分割ロール 2 本から構成されており、分割ロールの中央ではウェブは水平ロールと接触しないので、圧延後に座屈形状が残る場合がある。

堅ロール圧延実験の場合と同様に、幅圧下比と座屈形状比の関係を Fig. 6 に示す。Fig. 6 ではフランジとウェブの圧下率差で層別

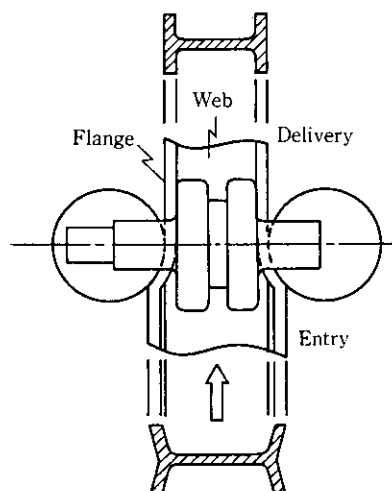


Fig. 5 Reduction method of web inner width by universal mill

Table 2 Experimental conditions for universal rolling

Material	Pure lead (99.99%)
Roll	S45C
Lubrication	No lubrication
Web inner width	80 mm
Flange width	30 mm
Web thickness	1.5~3.5 mm
Thickness ratio	1.5~2.0
Universal mill	
Horizontal roll	220 mmφ
Vertical roll	150 mmφ

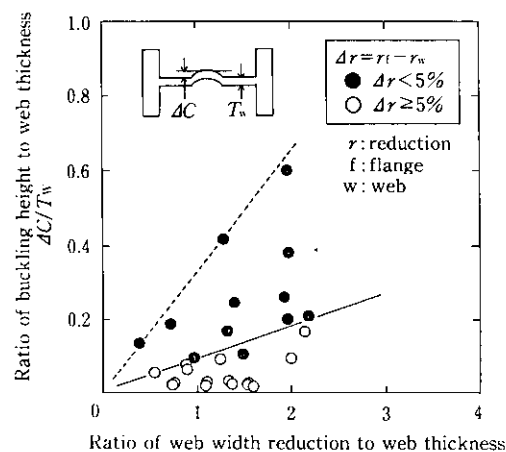


Fig. 6 Relation between buckling shape ratio and web width reduction ratio in the case of universal rolling

し、ウェブに対しフランジの圧下率を 5% 以上強圧下した場合を白丸(○)、また 5% 未満の場合を黒丸(●)で示している。本図からユニバーサル圧延機によるウェブの内幅縮小圧延ではウェブに対しフランジを 5% 以上強圧下すると、圧延後の座屈発生傾向が緩和され座屈防止に有効であることがわかる。

これはウェブよりもフランジの圧下率を大きくすることによりフランジの延伸が大きくなり、この結果ウェブに対してはフランジからの引張力が作用してこれが座屈防止に有効であったためと考えられる。フランジ強圧下条件で幅圧下比の限界値を求めると、本圧延方法では 2.0 となり、堅ロール方式に比べ大きな幅調整機能が得られる。

以上の結果から、ウェブ高さ寸法の制御方法としてユニバーサル圧延機によるウェブ内幅縮小方式の採用を決定した。

2.3 ユニバーサル圧延機によるウェブ内幅縮小圧延特性

本圧延法は、従来のユニバーサル圧延に比べ圧延特性がかなり異なるものと考えられる。これらを前節と同様の鉛モデル実験および熱間鋼実験で検討した。

2.3.1 噛み止め材の寸法分布

ウェブ内幅縮小圧延の際、材料の長手方向中央でロールの回転を停止して噛み止め、この材料のウェブ厚、ウェブ高さの長手方向分布を測定した結果を Fig. 7 に示す。実験圧延時、入側のウェブを板ガイドで案内しているが、ウェブ内面の拘束がなくなるガイド終了位置からウェブ高さの減少が開始している。この位置は垂直ロールでフランジ外面が圧下される位置よりかなり入側である。また、ウェブ厚は幅方向の 3 箇所測定したが、ウェブ高さの減少と同時に

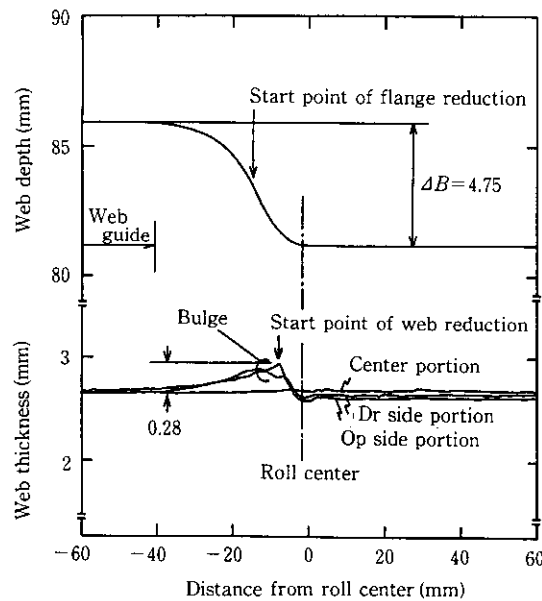


Fig. 7 Distribution of web thickness and web depth during web inner width reduction by universal mill

に幅方向端部の 2 箇所の厚みが増加を開始しており、水平ロールの接触弧長が増大している。これは板材の幅圧下の際にみられるドッグボーンと同様の変形である。幅可変水平ロールを用いているためウェブの幅方向中央はロールと非接触であるが、本図の圧延条件では圧延後に極端な板厚段差は発生していない。

2.3.2 平均圧延圧力

水平ロール、垂直ロールの圧延荷重をロードセルで測定し、圧延前後の厚みの実測結果から下式で投影接触弧長を求め、平均圧延圧力を求めた結果を Fig. 8 に示す。

$$L_{dBW} = \sqrt{2 R_V \times \left(\Delta t_f + \frac{\Delta B_W}{2} \right)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

L_{dBW} : 垂直ロール接触弧長 (mm)

R_V : 垂直ロール半径 (mm)

Δt_f : フランジ厚圧下量 (mm)

ΔB_W : ウェブ内幅圧下重 (mm)

Fig. 8 からウェブ内幅縮小量大のほど、水平ロールの平均圧延圧力が増加しているのに対し、垂直ロールでは減少の傾向を示している。図中ではフランジ厚の圧下を行わない場合を△で示しているが、このとき垂直ロールの荷重はウェブの幅方向圧下に要する反力のみと考えられ、高い平均圧延圧力を示している。フランジ厚の圧下を行わずにウェブ内幅を強圧下するとウェブに座屈が発生する場合があります、これを図では▲で示している。

またウェブ内幅の縮小量が多い場合には、水平ロールの平均圧延圧力はフランジ厚の圧下を行っても高い値を示している。これは、前項で示した入側でのウェブ幅方向端部の板厚増加の影響と考えられる。

2.3.3 中心偏り

ウェブ内幅の縮小圧下量が過大になると、入側でフランジが幅方向に移動して中心偏りが発生する。これは、ウェブ自体が変形する場合とフランジがウェブに対し偏ってロールに噛み込む場合がある。これを防止するには入側でウェブをロール直近まで案内すること、およびフランジの幅方向の移動を防止することが有効である。

Fig. 9 に圧延後の中心偏りに対するウェブガイドの隙間量の影響を示す。この図から、圧延材のウェブ面とウェブガイドの隙間を 2 mm 以内とすれば、中心偏りの防止に効果があるといえる。

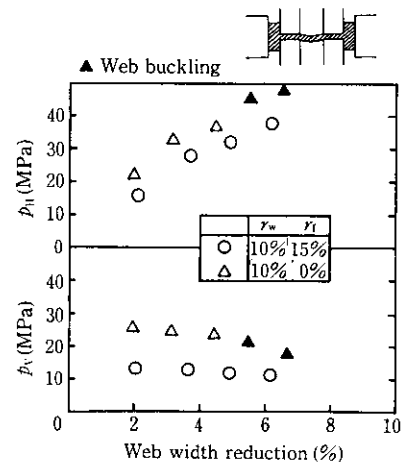
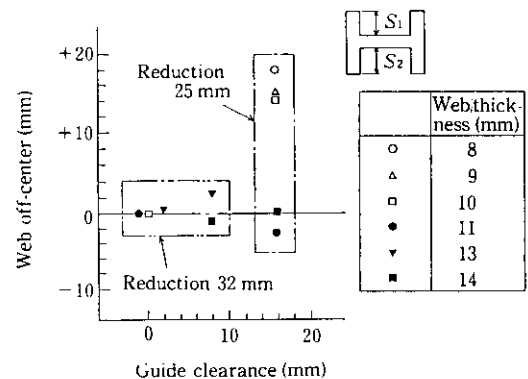
Fig. 8 Mean rolling pressure of horizontal roll, p_H and vertical roll, p_V 

Fig. 9 Relation between web off-center and web guide clearance

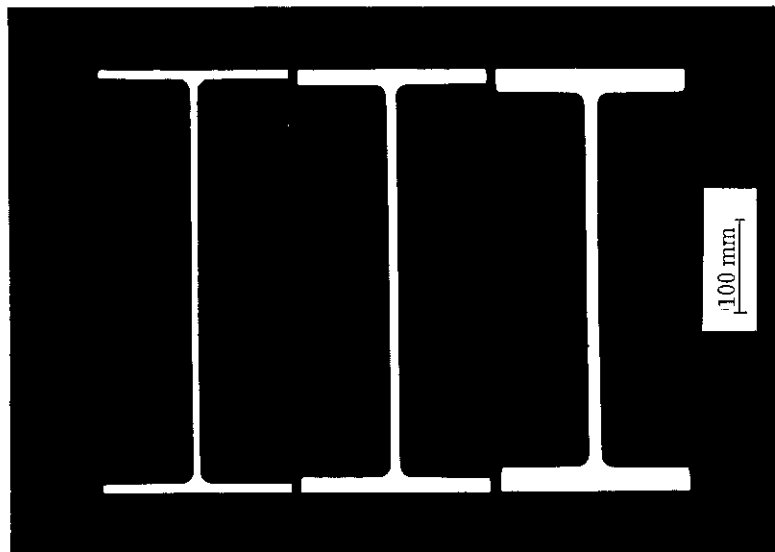


Photo 1 Cross section of Super HISLEND-H 450 x 200

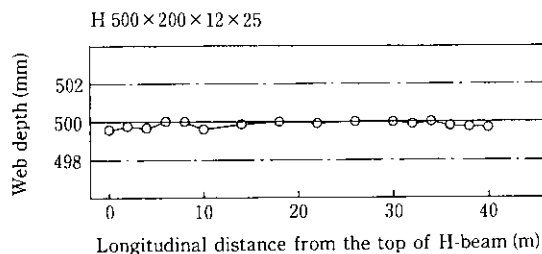


Fig. 10 Distribution of web depth in the longitudinal direction of H 500 x 200 beam

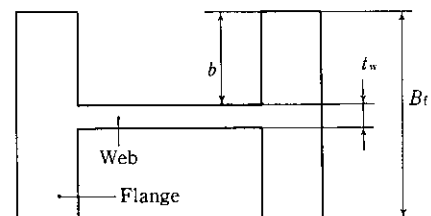


Fig. 11 Relation between flange width and other dimensions of H-beam

2.4 実機適用結果

水島製鉄所大形鋼工場の仕上げユニバーサル圧延機に幅可変の水平ロールを導入し、ウェブ高さが一定のH形鋼を「スーパーハイスレンドH」の名称で1989年11月より実生産を開始した。

Photo 1 に H 450 x 200 シリーズの3種類のサイズのH形鋼の断面を示すが、フランジ厚が異なるにもかかわらずウェブ高さが同一であり、外法寸法が一定である。

Fig. 10 に長手方向のウェブ高さの測定結果を示すが、全長にわたり許容範囲内であり、良好な寸法が得られている。

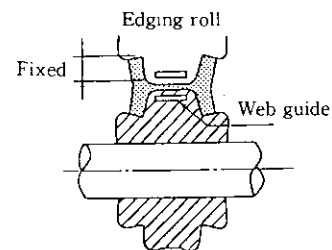


Fig. 12 Conventional edger rolling

3 フランジ幅制御技術

3.1 フランジ幅制御の課題と達成手段

Fig. 11 に示すように、H形鋼のフランジ幅 B_t は上下の脚長 b とウェブ厚 t_w の総和の寸法であり(3)式のようにになる。

$$\text{フランジ幅 } B_t = \text{ウェブ厚 } t_w + 2 \times \text{フランジ脚長 } b \dots \dots (3)$$

従来のエッジ圧延では Fig. 12 に示すようにカリバロールが使用され、エッジロールのカリバは上下脚長を規制することで中心偏りの発生を軽減する効果がある⁹⁾。しかしエッジロールのカリバ深さは圧延中は固定であることからフランジ脚長も固定寸法となり、従来圧延では、ウェブ厚 t_w の変化に応じてフランジ幅 B_t が変化し、外法一定とはならない。

このためフランジ幅を一定とするためには、ウェブ厚に応じてフランジ脚長 b を調整する必要がある。

エッジロールを交換することなく脚長を制御するため、フランジ幅圧下をカリバレスタイプのエッジで行い、中心偏り矯正をユニバーサル圧延機で行うことで機能分担を図り、これによりユニバーサル粗圧延工程での脚長制御を可能とする方針とした。

3.2 モデル実験による検討

3.2.1 ユニバーサル圧延機での中心偏り矯正効果

従来圧延では、ウェブを支えてユニバーサル圧延機に案内する方式であるため、圧延前の材料に中心偏りが発生していれば、そのままの状態では圧延されて中心偏りは矯正されない。

このことから、ウェブよりはフランジの幅中心をユニバーサル圧延機に誘導する方が中心偏り防止に効果があると考え、エッジ圧延機を含めて Fig. 13 に示す設備構成とした。本方式の特徴を以下に示す。

- (1) ユニバーサル圧延機前面に、フランジ上下を案内するフランジ拘束ローラガイドを設ける。
- (2) 往復圧延のため、ユニバーサル圧延機後面にも同様のフランジ拘束ローラガイドを設け、かつフランジ幅の圧下を行うカリバレスエッジを近接配置することにより、材料のユニバーサル圧延機への案内性を向上させる。

フランジ幅中心を水平ロール間隙中心に誘導することによる中心偏り防止効果を確認するため、フランジ幅拘束ローラガイドを設置

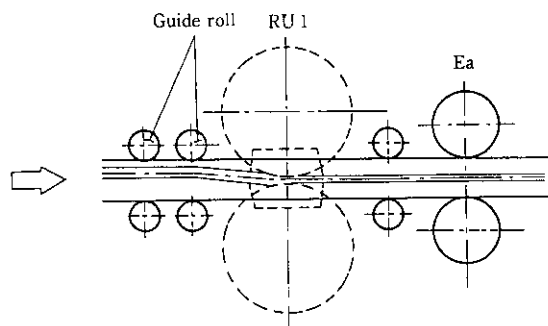


Fig. 13 New method of H-beam guiding

Table 3 Experimental conditions for grooveless edging

Material	Pure lead (99.99%)
Stock size (mm)	H55×30×3.0×3.5 H55×50×3.0×3.5
Universal mill reduction ratio	
Web	15%
Flange	16%
Edger mill reduction	2 and 4 mm

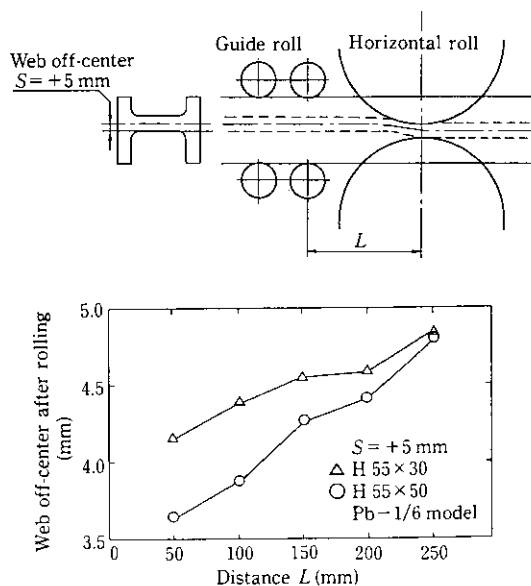


Fig. 14 Effect of flange guiding on a correction of web off-center

したユニバーサル実験圧延機にカリバレスタイプのエッジを近接配置し、Table 3 に示す条件で鉛モデル実験を行った⁷⁾。

実験では2種類のフランジ幅を用いて、中心偏りが+5 mm 発生したH型材を用いて、ローラとロール中心間距離を変化させて圧延した後、中心偏りの変化量を測定した。

圧延後の材料の中心偏りの測定結果を Fig. 14 に示すが、材料のフランジ幅が大で剛性が大きいほど、またローラとロール中心間距離が短いほど、中心偏り矯正効果が大きいことが明らかである。この結果からユニバーサル圧延機におけるフランジ外側拘束案内方式が中心偏り矯正に効果があるといえる。

3.2.2 カリバレスエッジの検討

カリバレスエッジでは、幅圧下時のフランジの倒れなどの発生防止が必要であることから、フランジを支持するための必要設備を決定するため、Table 3 と同様の条件で鉛モデル実験を行った。

Fig. 15 に示すように、安定圧延のためには、エッジへの案内用の上下水平ローラガイド (HG)、左右垂直ローラガイド (VG) および中心偏り防止のためのウェブガイド (WG) などが必要と考えられるので、それらが圧延時の材料の姿勢保持にどの程度有効かを検討した。

ガイド方式を変更してエッジング圧延を行った後の横断面形状を Fig. 16 に示す。図から、材料の長手方向中央部では全くフランジ

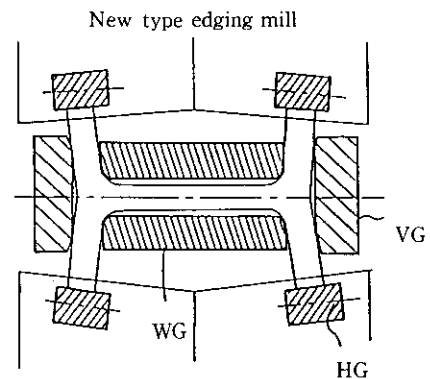


Fig. 15 Guiding facilities of new type grooveless edger rolling

		HG + WG	HG + VG + WG
E-type	Middle		
	Tail end		
B-type	Middle		
	Tail end		

Fig. 16 Cross sections of H-beam after experimental grooveless edger rolling

倒れは発生せず、ガイド構成が HG+WG の場合に、後端部で、ウェブの座屈が若干見られるがフランジの倒れはみられない。これらのガイドに VG を追加したガイド構成においてもほぼ同様な傾向である。これらの結果から、VG の必要性は小さく、HG+WG 方式で十分であるとの結論を得た。

3.3 実機適用結果

モデル実験の結果より設備仕様を決定し、実機工程への適用を行った。ユニバーサル粗圧延機とエッジ圧延機間の距離は従来は 5000 mm であったが今回開発設備では 1890 mm の近接配置とし、ガイドは幅調整可能としてシリーズごとの交換は不要とした。

中心偏りとフランジ幅の精度を、従来方式と今回開発の方式を比較して Fig. 17 に示すが、両者はほぼ同等の精度である。

本圧延方式の導入により、フランジ幅の一定化が達成されると同時に、今回開発したエッジ圧延機はロール、ガイドともサイズフリーであることから、組み替え時間の大幅な短縮と Table 4 に示すようなロール保有数の削減などの効果をあげることができた。

4 結 言

外法一定の H 形鋼を熱間圧延工程で経済的に製造するため、モデル実験により種々の検討を行った結果、下記のような外法寸法制御技術確立した。

- (1) ウェブ高さ寸法を制御するためユニバーサル圧延機によるウェブ内幅縮小圧延法を開発した。
- (2) 本圧延法はウェブ内幅の縮小圧下と同時にフランジの厚さ圧下ができることから形状不良の防止、寸法精度安定化などが図れるなどの特長を有する。
- (3) フランジ幅寸法を制御するため、カリバレスエッジによるフランジ幅圧延法を開発した。
- (4) フランジの幅制御の際に必要な中心偏りの精度向上のため、ユニバーサル圧延機におけるフランジ外側拘束案内方式を採用した。

H-500×200

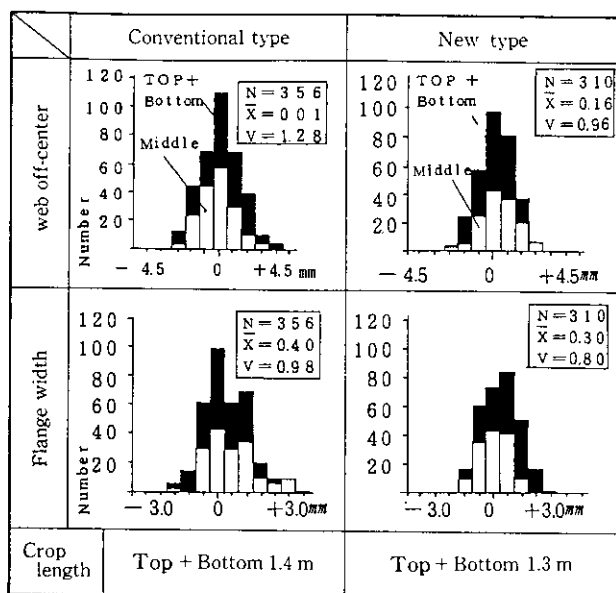


Fig. 17 Comparison of accuracies of web off-center and flange width between conventional rolling and new type rolling

Table 4 Effect of reducing the number of guide facilities

	Edging roll	
	Conventional	New
Kind of shape	23	1
Number of rolls	30 set	1 set

- (5) これらの圧延方式は形鋼のサイズフリー圧延技術を実現するものであり、既設設備に容易に導入できるなどの特長を有する。

参 考 文 献

- 1) 林 宏之, 鎌田征雄, 朝生一夫, 瀬戸恒雄, 三浦啓徳, 藤本洋二: 材料とプロセス, 3 (1990) 2, 489
- 2) 林 宏之, 鎌田征雄, 朝生一夫, 瀬戸恒雄, 三浦啓徳, 藤本洋二: 材料とプロセス, 3 (1990) 2, 490
- 3) 三浦啓徳, 笹田幹夫, 瀬戸恒雄, 中西輝行, 林 宏之, 藤本洋二: 材料とプロセス, 2 (1989) 2, 498
- 4) 藤本洋二, 朝生一夫, 斎藤晋三, 昌中 淳, 中島英二, 藤岡克志: 材

料とプロセス, 2 (1989) 5, 1570

- 5) 林 宏之, 鎌田征雄, 朝生一夫, 瀬戸恒雄, 三浦啓徳, 藤本洋二: 第21回塑性加工春季講演会, 216 (1990), 289
- 6) 河村有秀, 奥村 寛: 鉄と鋼, 72 (1986) 12, S1238
- 7) 藤本洋二, 朝生一夫, 瀬戸恒雄, 三浦啓徳, 笹田幹夫, 林 宏之: 第21回塑性加工春季講演会, 217 (1990), 293