

# 建築鉄骨の現場溶接時の収縮変形に関する研究 (その1)

—柱・梁接合部近傍の溶接による収縮変形—

中 辻 照 幸  
藤 盛 紀 明

## § 1. はじめに

現在、建築物の構造の主流は、鉄骨構造になりつつある。鉄骨構造物にとって溶接はなくてはならないものである。特に無騒音で作業可能で、継手数が減少し、運搬が能率化され、耐火被覆量が減少し、建物空間の有効利用が可能であるなどの点から、柱・柱接合部、柱・梁接合部の現場溶接は常識化している。なによりも部材が極厚化している現在、溶接以外に接合方法はない。

したがって溶接は接合方法として現在のところ最も有効な手段であるが、鋼に高熱を与えて接合するという性質上、種々の問題を有している。それらの1つに溶接による収縮変形という問題がある。梁を柱に現場溶接した場合、継手部は収縮変形し、スパン間は小さくなる。特に超高層ビルや横に長い建築物の場合、収縮量が累積されて次節の梁の納まりや、外装材の納まりなどに支障をきたす場合がある。したがって、建築鉄骨の建方方法を論じる場合、建方精度と溶接による収縮量を定量的に把握し、最適な溶接順序を決定する理論が必要である。

本報告は、柱・梁接合部に最もよく用いられるウェブをH. T. ボルト接合し、フランジを溶接接合する混用継手に着目し、裏当て金付きT型突合せ多層盛溶接時の収縮量について、基礎的な理論解析と実験、および柱・梁接合部実物大模型実験を行なったものである。

## § 2. 基礎実験

本章では、柱・梁フランジ溶接接合部を想定した裏当て金付きT型突合せレ型開先多層盛溶接部の自由収縮について、理論解析および実験を行なった。

### 2.1 理論解析

裏当て金付き多層盛溶接継手の溶接による収縮量は、各々の層の溶接をビードオンプレートで溶接したと考え

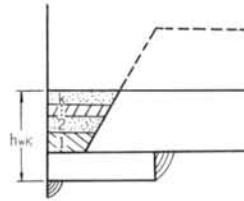


図-1

た時の各層の収縮量の総和であるとする。すなわち、図-1において第kパス目の収縮量を  $h_{wk}$  の板厚にビードオンプレート溶接した時の収縮量と考え、前層までの収縮量

に加え、第kパス目までの収縮量とする。

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_k \quad \dots(1)$$

( $\delta$ ; k パス目までの収縮量,  $\delta_k$ ; k パス目の収縮量)

佐藤, 寺崎<sup>1)</sup>によれば、ビードオンプレート溶接の横収縮量は次式に示される(溶接長が200mmの場合)。

$$\delta/\epsilon_{Y0} h = a\tau_0^2 + b\tau_0 \quad \tau_0 \leq f \quad \dots(2)$$

$$\delta/\epsilon_{Y0} h = \tau_0 \quad \tau_0 > f \quad \dots(3)$$

$$\begin{cases} a = -9.26 \times 10^{-4} \tau_M + 2.62 \times 10^{-2} \\ b = 9.3 \times 10^{-3} \tau_M + 1.38 \times 10^{-1} \\ f = 1.852 \tau_M + 2.76 \times 10 \end{cases}$$

$\delta$ ; 横収縮量 (cm),  $\epsilon_{Y0}$ ; 基準温度での降伏歪,  $h$ ; 板厚 (cm),  $\tau_0 = \alpha Q / c\rho h^2 \epsilon_{Y0}$ ,  $\alpha$ ; 線膨張係数,  $c$ ; 比熱,  $\rho$ ; 密度,  $Q$ ; 入熱量 (Cal/cm),  $\tau_M = \alpha T_{YM} / \epsilon_{Y0}$ ,  $T_{YM}$  = 降伏応力が零になる温度 (°C)

さて、1 Amp. 1秒当たりの溶接金属の溶融重量(比溶融量  $m$ ) は、安藤<sup>2)</sup>らによれば電流にほぼ無関係で一定であり、低水素系溶接棒の場合約 3 mg/A·s である(安藤<sup>2)</sup>らおよび筆者らの実験結果による)。この比溶融量を用いれば、各パスの溶着金属の断面積  $S_B$  は、

$$S_B = mI/\rho v \quad (\text{cm}^2) \quad \dots(4)$$

$I$ ; 電流(A),  $v$ ; 溶接速度(cm/s)

で示される。

また、裏当て金付きレ型開先の場合、開先間隔を  $G$  (cm), 開先角度を  $\beta$ , 裏当て金の板厚を  $H$  (cm) とすれば、第kパス目の板厚  $h_{wk}$  (cm) は次式で示される。

$$h_{wek} = \frac{-G + \sqrt{G^2 + 2 \left( \sum_{k=1}^k S_{Bk} \right) \tan \beta}}{\tan \beta} + H \quad \dots\dots(5)$$

( $S_{Bk}$ ;  $k$  パス  
目の溶着金属断  
面積)

多層盛溶接の場合、盛  
って行くにしたがい開先  
間隔( $a$ )が徐々に大きく  
なるため、1層を数パス

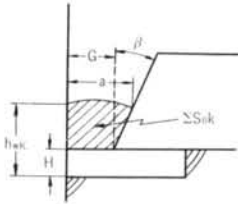


図-2

で溶接することになる。このことを考慮に入れると、式  
(5)は次のように示される。

$$\left\{ \begin{array}{l} h_{wei} = \frac{-G + \sqrt{G^2 + 2 \left( \sum_{i=1}^i A_i \right) \tan \beta}}{\tan \beta} \quad \dots\dots(6) \\ A_i = \sum_{k \leq i} S_{Bk} \end{array} \right.$$

したがって  $N$  層溶接手の収縮量  $\delta_T$  は、

$$\delta_T = \varepsilon_{Y0} \sum_{i=1}^N h_{wei} (a \tau_0^2 + b \tau_0) \quad \dots\dots(7)$$

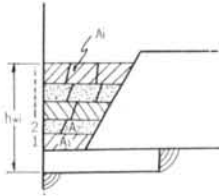


図-3

以上は、溶接長が 200 mm の場合についてであるが、  
西川<sup>3)</sup> は溶接長と収縮量の間次のような関係を実験的  
に導き出している。

$$\delta_1 / \delta_2 = (L_1 / L_2)^{0.15} \quad \dots\dots(8)$$

( $\delta_i$ ; 溶接長  $L_i$  の時の収縮量)

[計算例]

溶接長が 200 mm の時、開先間隔を 7, 9, 12 mm に、

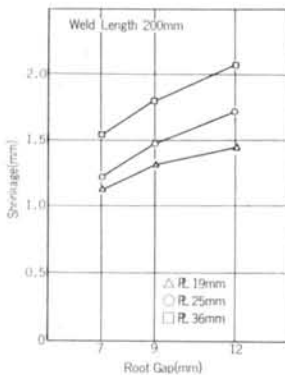


図-4 裏当て金付き継手の収縮量とルート間隔、板厚の  
関係 (計算例)

	4φ棒	5φ棒
$I$ (A)	180	240
$V$ (V)	30	
$v$ (cm/s)	0.225	
$\eta$	0.8	
$c$ (cal/g·°C)	0.13	
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	7.8	
$T_{YM}$ (°C)	830	
$\alpha$ (°C <sup>-1</sup> )	$12 \times 10^{-6}$	
$\varepsilon_{Y0}$	$1,700 \times 10^{-6}$	
$m$ (g/A·s)	$3 \times 10^{-3}$	

表-1

機械的性質			化学成分(%)				
最大耐力	降伏耐力	伸び	C	Si	Mn	P	S
54kg/mm <sup>2</sup>	35kg/mm <sup>2</sup>	25%	0.17	0.41	1.31	0.018	0.013

表-3 供試材料の機械的性質および化学成分

開先間隔	7mm			9mm			12mm		
	数量	4体	1体	2体	数量	4体	1体	2体	
電 流 (A)	180			240					
電 圧 (V)	30			30					
溶溶接速 (cm/s)	0.2			0.225					

表-4 試験体数量

表-5 溶接条件

板厚を 19, 25, 36 mm に変えた場合の最終収縮量につい  
て、以上の解析を基に計算した結果を図-4 示す。開先  
角度は 35 度と一定した。溶接条件および各定数は表-1  
に示す。また、開先間隔による溶接棒径の選択および各  
層のパス数を表-2 に示す。なお、裏当て金の板厚を 9  
mm と一定とした。この場合、表-1 の溶接条件は初層  
から  $\tau_0 < f$  であるので、計算には式(2)を用いた。

図-4 より開先間隔、板厚によって最終収縮量が異な  
り開先間隔が大きいほど、また板厚が大きいほど最終収  
縮量の大きいことがわかる。なお、溶接長が 300 mm の  
場合、同じ開先間隔、板厚に対して式(8)から溶接長 200  
mm の 1.06 倍の収縮量になる。

## 2.2 実験

### 2.2.1 試験体および試験治具

供試材料は市販の SM50A を用いた。材料の機械的性  
質および化学成分は表-3 に示す。試験体形状は図-5  
に示すように、板幅 300 mm、板厚 25 mm、長さ 1 m で  
開先角度は  $35 \pm 2$  度とし、ルート面は  $2 \pm 1$  mm とし  
た。試験体数量は表-4 に示す。

試験体を溶接する時、図-6 に示すような治具を H  
型鋼で組み立て、試験体をローラではさみ角変形のみを  
拘束した。溶接による横収縮は自由である。

### 2.2.2 実験方法

溶接による収縮量はダイヤルゲージ (D. G.) を用いて

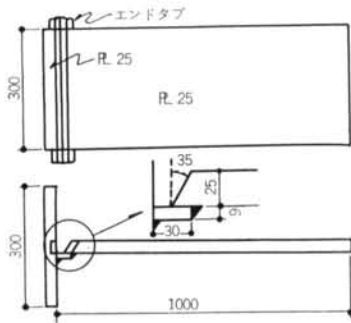


図-5 試験体形状

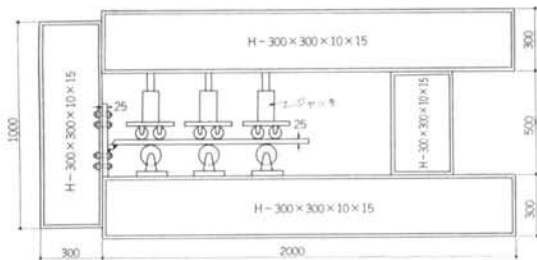


図-6 自由収縮量測定のための実験装置

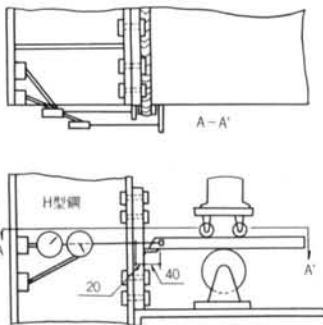


図-7 ダイヤルゲージ取り付け位置

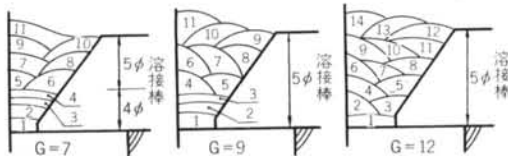


図-8 溶接金属の盛り方

測定した。D. G. は溶接開始側および溶接終端側に、それぞれ2個ずつ図-7のように取り付けてある。収縮量はそれぞれ片側につけた2個のD. G. の読みの差によって求めた。

溶接条件は表-5に示す。溶接棒は50キロ級高張力鋼用低水素系溶接棒を用いた。各開先間隔に対する溶接金属の盛り方、および層数は図-8に示す。

### 2.2.3 実験結果

溶接終了後完全に冷却した後(溶接終了2時間後)の

	機械的性質			化学成分 (%)				
	最大耐力 (kg/mm <sup>2</sup> )	降伏耐力 (kg/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	C	Si	Mn	P	S
梁フランジφ25	59	41	22	0.16	0.45	1.46	0.013	0.016
梁ウェブ φ9	54	41	27	0.12	0.36	1.24	0.015	0.015
" φ12	51	38	24	0.12	0.37	1.25	0.018	0.014
柱フランジφ19	54	39	25	0.12	0.38	1.36	0.011	0.009
	51	34	24	0.15	0.37	1.44	0.017	0.023

表-6 供試材料の機械的性質および化学成分

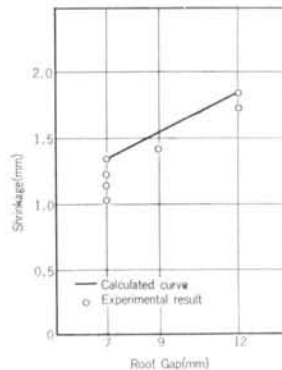


図-9 裏当て金付き継手の収縮量とルート間隔の関係(実験値と計算値)

最終収縮量を図-9に示す。図中の実験結果は、溶接開始側と溶接終端側の平均最終収縮量である。図中の実線は図-8の溶接金属の盛り方による溶接長300mmの場合の式(7)、(8)からの計算値である。図-4の計算値は折れ線になっているのに対し、図-9の計算値はほぼ直線である。これは、溶接金属の盛り方の違いによるものである。

実験値と計算値を比較すれば、後者の方がやや高い傾向にあるが、ほぼよい一致を示している。

## § 3. 柱・梁接合部実物大模型実験

本章では、柱・梁接合部の実物大模型を作成し、溶接時の収縮量および変形量を測定した。H. T. ボルトと溶接の混用継手では、H. T. ボルト締めの方が一般に行なわれているため、溶接による収縮が拘束されたり、逆に収縮によってH. T. ボルトがすべる可能性がある。また、フランジの収縮によってウェブに圧縮力が働き、内外変形が生じることも考えられる。以上の点に着目し、実験を行なった。

### 3.1 試験体の作成

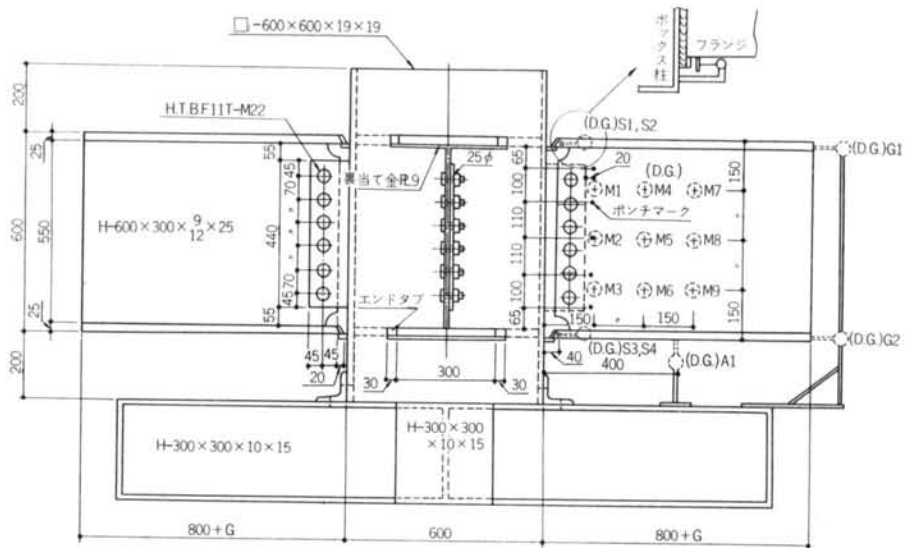


図-10 柱・梁接合部実物大模型試験体

梁 成 (mm)	600	
梁 幅 (mm)	300	
フランジ厚(mm)	25	
ウェブ厚 (mm)	9	12
開先間隔 (mm)	7	9 12 7
数	Aシリーズ	2 1 2 2
	Bシリーズ	2 1
	Cシリーズ	2
量	計12体	

表-7 試験体数量

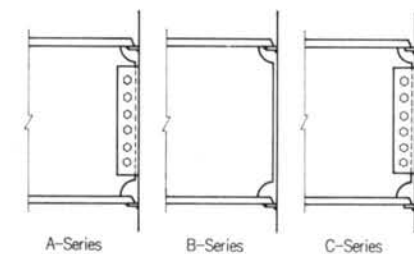


図-11 試験体の種類

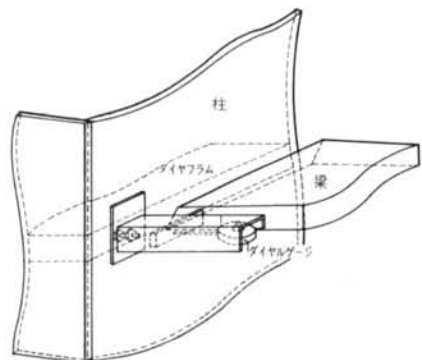


図-12 溶接部近傍の収縮量の測定

### 3.2 実験方法

実験の測定項目は、以下に示すとおりである。

- ① 溶接継手部近傍 (G. L.=40mm) の収縮量 (D. G. S1~S4)
- ② 全体 (梁端) の収縮量 (D. G. G1, G2)
- ③ H. T. ボルトのすべり (ノギス, G. L.=20mm(ポ  
ンチマーク間))
- ④ ウェブの面外変形量 (D. G. M1~M9)
- ⑤ 梁の角変形 (D. G. A1)

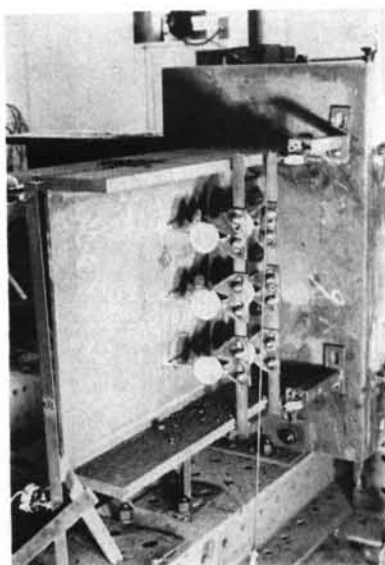
D. G. の取り付け位置およびポンチマークの位置を図-10に示す。D. G. S1~S4は、図-12に示すように柱のダイヤフラムの高さの位置の柱フランジから治具で取りつけた。また、D. G. M1~M9は写真-1に示すように梁フランジの縁から治具で取りつけた。

溶接条件は表-8に示す。溶接棒は50キロ級高張力鋼用低水素系溶接棒を用いた。各開先間隔に対する溶接金

供試材料は市販のSM50Aを用いた。材料の機械的性質および化学成分は表-6に示し、試験体の形状および寸法は図-10に示す。

試験体の種類および数量を図-11、表-7に示す。試験体は図-11に示したように、裏当て金(板厚9mm)の取り付け状態、およびH. T. ボルト接合の有無によってA, B, Cの3シリーズを作成した。AシリーズはウェブをH. T. ボルト接合し、裏当て金を柱と梁に溶接接合した。BシリーズはウェブのH. T. ボルト接合を行わず、裏当て金を柱と梁に溶接接合した。CシリーズはウェブをH. T. ボルト接合し、裏当て金は柱側のみ溶接接合した。Cシリーズは現場で裏当て金を取りつける場合、時々見られる形態である。

H. T. ボルトはF11T-M22を使用した。締めつけ位置は図-10に示すとおりで、締めつけトルク値は70kg・mとした。ウェブとガセットプレートの摩擦面は一律に赤く見えるさびの状態とした。



写真—1

	4φ棒	5φ棒
電 流 (A)	180	240
電 圧 (V)	28~33	28~33
溶接速度 (cm/s)	約0.18	約0.24

表—8 溶接条件

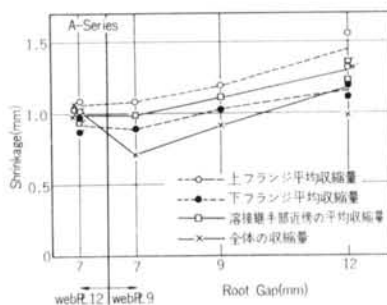
属の盛り方、および層数は2.2.2の図—8と同じである。

下フランジの溶接は、上フランジ溶接終了2時間後、3~4パスごとにウェブの左右を、ふりわけ溶接した。

### 3.3 実験結果および考察

#### 3.3.1 最終収縮量

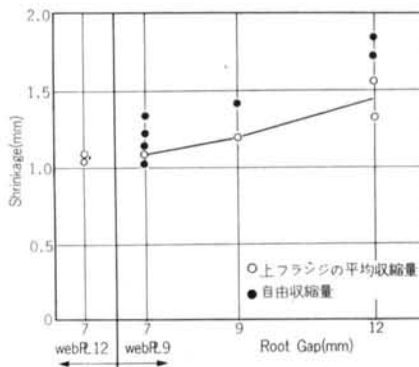
図—13は、Aシリーズについて溶接継手部近傍上下フランジの溶接開始部と溶接終端部の平均最終収縮量、および梁端部で測定した全体の最終収縮量を示したものである。上フランジ平均最終収縮量は下フランジに比べて大きい傾向にある。そして、上下フランジの平均最終収縮量と比較して全体の最終収縮量は同等あるいはそれ以下である。ウェブの板厚が12mmの場合、継手部近傍と全体の最終収縮量は同等になっている。この原因については明らかではないが、筆者らは以下に述べる理由であろうと推定している。溶接継手部を溶接すると、熱伝導によってフランジ全体が膨張する。AシリーズはウェブがH.T.ボルト接合され、下フランジの裏当て金が溶接されているため、梁全体が柱に拘束されており、上フランジ溶接時の膨張変形がウェブパネルに力を加える。ウェブが厚い場合、ウェブパネルの剛性が大きく、フランジの膨張中ウェブは弾性変形を保つ。しかし、ウェブが薄くなると、剛性が小さくフランジの膨張中にウェブパネルに何らかの塑性変形が生じ、その膨張変形が残留す



図—13 溶接による最終収縮量



図—14 各シリーズの最終収縮量



図—15 自由収縮量とウェブにH.T.ボルトの拘束のある場合の収縮量

るため全体の収縮量が小さくなるものと思われる。

図—14は、各シリーズごとの開先間隔7mmの試験体の最終収縮量を示したものである。B、CシリーズはAシリーズに比較して最終収縮量は大きい。

B、Cシリーズは継手部近傍と全体の収縮量が同等の値になっている。Bシリーズが同等の値になるのは、H.T.ボルトがないためである。Cシリーズが同等となるのは、上フランジ溶接終了時にH.T.ボルトを中心に梁が回転変形している(図—18参照)ことからわかるように、梁が一体となって回転変形しているの、Aシリー

ズと異なりウェブに力が加わらず、塑性変形も生じないためと思われる。

AシリーズとBシリーズの継手部近傍の最終収縮量の差は、ウェブのH. T. ボルト接合による拘束の有無によって生じる。図-15にAシリーズの上フランジの平均最終収縮量と2.2.3で行なった自由収縮量についての実験結果を併せて示してある。両者を比較すると、ウェブの

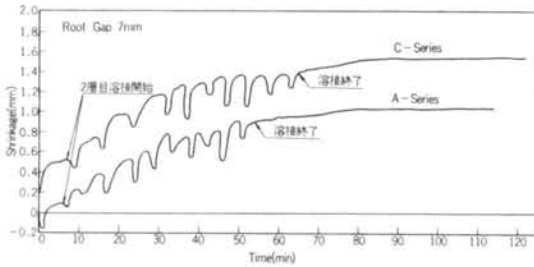


図-16 A, Cシリーズの収縮過程

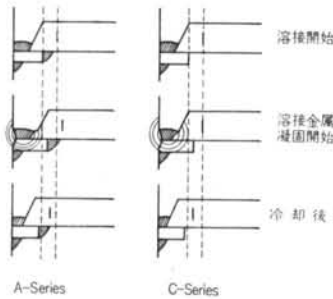


図-17 溶接時の膨張収縮過程

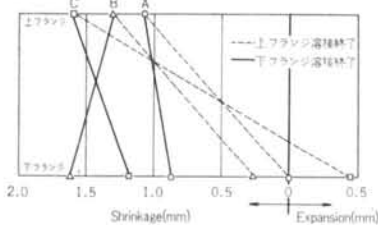


図-18 各シリーズ試験体の上, 下フランジ溶接終了2時間後の変位

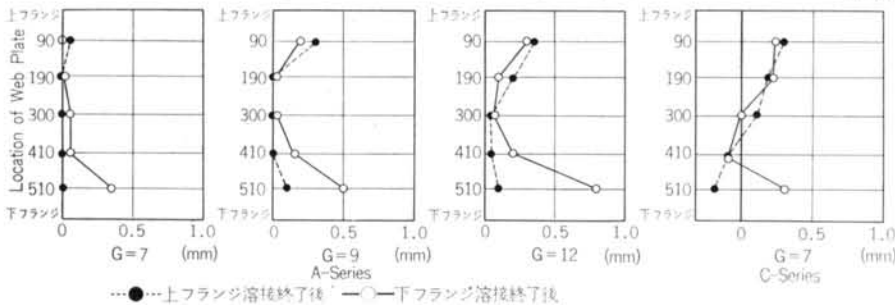


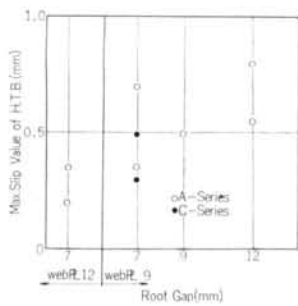
図-19 H. T. ボルトのすべり量

H. T. ボルト接合の拘束によって、最終収縮量は10~20%程度低下する。

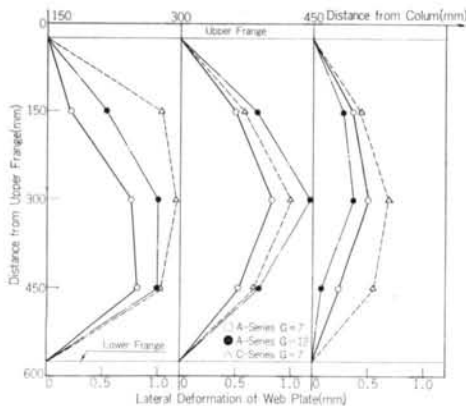
AシリーズとCシリーズの継手部近傍の最終収縮量の差のほとんどは、初層溶接時の収縮変形過程の差によって生じる。図-16にA, Cシリーズの上フランジ溶接開始側の溶接中および溶接後の変形挙動を示す。図-16から、明らかに最終収縮量の差はほとんど初層の収縮量の差であることがわかる。これは、裏当て金の取り付け状態の差によるものである。すなわちAシリーズの場合、図-17の模式図に示すように裏当て金と柱と梁フランジが一体となっているので、ビードオンプレートの場合と同様膨張過程を示し、母材溶接部の膨張量が冷却後そのまま収縮量にならない。しかし、Cシリーズの場合は、裏当て金と梁フランジが一体となっておらず、裏当て金が膨張しても、フランジは膨張方向に変位せず、母材溶接部の膨張量が冷却後そのまま収縮量になる。この差が初層溶接終了時の収縮量の差になる。2層目以降、A, Cシリーズはほとんど同じ変形状態を示す。

図-18は各シリーズ開先間隔7mmのものについて上フランジ溶接終了2時間後と、下フランジ溶接終了2時間後の溶接継手部近傍の変位量を示す。上フランジ溶接終了後、Aシリーズの下フランジは変位せず、Bシリーズの下フランジは収縮方向に変位し、Cシリーズの下フランジは膨張方向に変位する。これは裏当て金の取り付け状態とウェブのボルト接合部の有無によるものである。

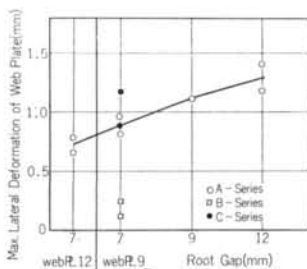
Bシリーズは裏当て金と柱と梁に溶接接合され、ウェブのH. T. ボルト接合がないため、上フランジの収縮によって生じる圧縮力を裏当て金と柱と梁が全部受けもち、裏当て金および裏当て金のすみ肉溶接部が圧縮変形し、下フランジが収縮方向に変位する。CシリーズはウェブがH. T. ボルト接合され、裏当て金と柱と梁に溶接接合され、かつ、ウェブがH. T. ボルト接合されているの



図一20 H. T. ボルトの最大のすべり量



図一21 ウェブに生じる面外変形量の分布



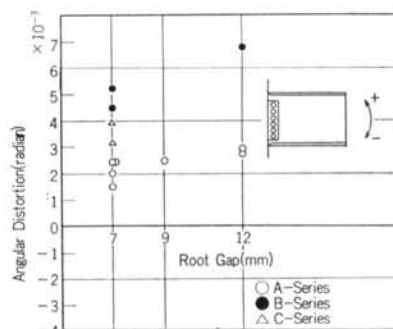
図一22 ウェブに生じる最大面外変形量

で、上フランジの収縮によって生じる圧縮力をH. T. ボルトと裏当て金を受けもつため、下フランジではほとんど変位しない。

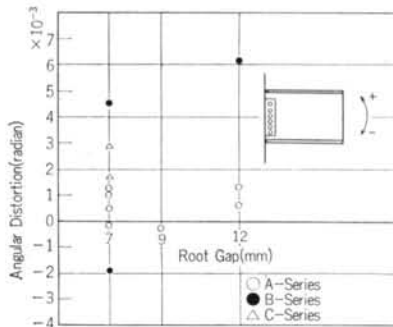
### 3.3.2 H. T. ボルトのすべり

H. T. ボルトのすべりは全試験体で生じた。図一19はA, Cシリーズの上,下フランジ溶接終了2時間後のH. T. ボルトのすべり量を示してある。特に上フランジに近いH. T. ボルトが大きなすべり量を示している。また、Cシリーズについては、前述したようにH. T. ボルトを中心に回転変形しているのがわかる。

H. T. ボルトの最大のすべり量についてまとめたのが図一20である。すべり係数のばらつきのため実験値にか



図一23 上フランジ溶接終了2時間後の角変形量



図一24 最終角変形量

りのばらつきがみられるが、開先間隔が大きいほど最大すべり量も大きくなる傾向にある。

### 3.3.3 ウェブの面外変形

梁フランジの溶接により収縮した場合、ウェブはH. T. ボルトで接合されているためウェブに圧縮応力が働き面外変形が生じる。溶接完了後のウェブの面外変形の状態を図一21に示す。面外変形は、ガセットプレートの反対側に腹ふくらみになる状態に生じ、梁中央部が最大になった。図一22は、各試験体の最大面外変形量を示したものである。開先間隔が大きくなるほど最大面外変形量も大きくなり、ウェブの板厚が大きくなれば最大面外変形量は小さくなる。

### 3.3.4 角変形

試験体の上フランジ溶接終了2時間後の角変形量を図一23に、最終角変形量を図一24に示す。上フランジ溶接終了時は全試験体が上方向に角変形しているが、下フランジを溶接することによって、角変形量は小さくなる。Aシリーズは他に比較して角変形量は小さく、Bシリーズの最大のものでも  $6.2 \times 10^{-3}$  ラジアン (0.35度) と問題になるような角変形量でない。

## § 4. まとめ

本研究の結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 裏当て金付きT型突合せレ型開先多層盛溶接部の自由収縮量について理論解析を行なった結果、開先間隔、板厚によって収縮量が異なることが明らかになった(図-4)。
- (2) 自由収縮量について、理論解析を確認するため実験を行なったが、解析値と実験値はほぼよい一致を示した(図-9)。
- (3) 実際の柱・梁混用継手接合部のようにH. T. ボルト接合によるウェブの拘束があると、継手部近傍の溶接による収縮量は自由収縮量に比較して10~20%程度小さくなる(図-15)。

- (4) 裏当て金付き溶接継手の収縮量は裏当て金の仮付け溶接の状態によって異なり、裏当て金を柱・梁に完全に溶接接合していない場合、約1.5倍の収縮量になる(図-16, 17)。
- (5) フランジ溶接の収縮により、全試験体にわたってウェブのH. T. ボルトにすべりが生じた(図-19, 20)。
- (6) フランジ溶接の収縮により、ウェブに圧縮応力が働き面外変形が生じる(図-21, 22)。
- (7) フランジの溶接により梁に角変形が生じるが、問題になるような角変形量ではない(図-24)。

## 謝 辞

本実験を遂行するにあたり、多大なご協力をいただいた諸橋工業株式会社、川田両氏に謝意を表します。

## 〈参考文献〉

- 1) 佐藤他：“溶接変形の熱弾塑性パラメーターによる検討” 溶接学会概要集15集 1974
- 2) 安藤他：“溶接アーク現象” 産報
- 3) 西川：“多層盛溶接継手の溶接変形におよぼす各種要因の影響” 大阪大学溶接工学科卒論 1975