

鉄骨構造物の現場溶接工法 (R-H工法)

Field Welding Method of Building Steel Structures (R-H Welding Method)

高橋 千代丸*

Chiyomaru Takahashi

川島 義克*

Yoshikatu Kawashima

Synopsis :

R-H welding method is a kind of welding process for column to column, or column to beam joints. This method employs the technical know-how related to welding condition, groove shape, working condition and effect of welding heat.

To secure this know-how, the various efficiency tests for the joints were performed to decide the best welding condition and groove shape. By the full and nearly full scale experiments, the study was made on welding specification, shrinkage by welding heat, residual stress and temperature gradient, and, as the results, the safety of the joints was confirmed.

Furthermore some other data were obtained from the practical construction site.

This paper presents these efficiency tests for the joints, the results of full scale experiments, and supervision of welding method.

1. まえがき

超高層ビルに端を発した建築鉄骨構造における現場溶接工法は、その後、中高層ビルにも採用されるようになり順調な発展を続けている。その理由としては、鉄骨建築の現場に適合した高能率溶接工法の開発と工場加工における部材精度の向上、品質のすぐれた溶接性鋼材の普及、そして各種検査方法の確立による信頼性の向上など全般的な鉄骨建築の施工に関する技術レベルの向上に負うところが大きい。

当社でも、もちろん、土木建築における溶接技術の研究開発という観点から、R-H工法と称してH形鋼部材の現場接合を中心とした溶接工法の体系的開発を行ない、すでに各種の建物に採用してきた。

この報告は、R-H工法に関し、現在までに実施してきた多くの実験結果、および実際の施工現

場から得られた各種のデータ、さらに現場における溶接管理方法や溶接部の検査法などについて述べたものである。

2. 現場溶接工法の意義

鉄骨建築の施工としては、柱にはりを接合するためのブラケットを工場で溶接し、現場においてブラケットとはり、および柱一柱を高力ボルトやリベットを用いて接合する方法が一般に採用されている。

現場溶接工法とは、これら高力ボルトなどによる接合の代わりに、現場において、はり材を直接柱材に溶接し、さらに柱一柱をも溶接により接合しようとする工法のことである。

建築物が超高層化することにより、極厚の形鋼が使用されるようになると、ボルトやリベットでは経済的にも技術的にも接合が困難になり、それと同時にすぐれた溶接機器が開発されたことなど

* 本社鋼構造研究所構造研究室

とあいまって、現場溶接工法が一般的に採用されるようになった。最近では中層程度の小規模な鉄骨建築でも現場溶接によって施工される事例が多くなった。

現場溶接工法のメリットとしては、

- (1) 極厚、超極厚の部材でも接合が可能である
- (2) 製作工数が減少する
- (3) 鋼材重量が節約できる
- (4) 仕上り寸法が小さくてすむ
- (5) 継手効率がよい
- (6) 運搬費が減少する

などが考えられる。以下具体的に説明すると、

(1) 超高層建築物では、柱の寸法を小さく留めるために、極厚、超極厚の部材を使用する必要があり、最近ではフランジ厚 100mm 前後の H 形鋼がの使用例もある。このような部材をボルトやリベットで接合することは、技術的に困難である。

(2) とくに柱一はり接合部における従来のブラケット工法では、ブラケットを工場で溶接し、現場でボルトやリベットで接合する二重作業が必要であったが、これを現場溶接接合一回で済ませられることになる。また、スプライスプレートやボルトの穴明け加工も減少する。

(3) スプライスプレートやボルト、リベットなどの継手用部材が減少するほか、ボルト穴によ

る断面欠損を考慮する必要がないため鋼材重量が節約できる。

(4) スプライスプレートやボルト頭などの突出部がないため、耐火被覆や床用デッキプレートに影響を与えないので、柱一はりの仕上り寸法が小さくてすむ。このことは床の有効面積の増加、階高の低減による建物全体の経済性に大きく影響する。

(5) ボルトやリベットホールによる断面欠損を考慮する必要がないので、部材の全断面で応力を伝達することが可能である。

(6) 柱にブラケットなどの突起物がなくなることにより輸送の効率化が図れる。

以上のように現場溶接工法を採用すると数々のメリットがあるが、経済的な、しかも確実な接合部を得るためには、各現場における種々の条件、建築物の規模、現場状況、鉄骨業者の技量などにより、最も適当な溶接方法、溶接材料を選ぶことが重要となる。

3. R-H 工法

3-1 R-H工法の特長

R-H 工法とは、H形鋼を対象とした鉄骨建築の現場溶接工法である。R-H 工法の名称は当社

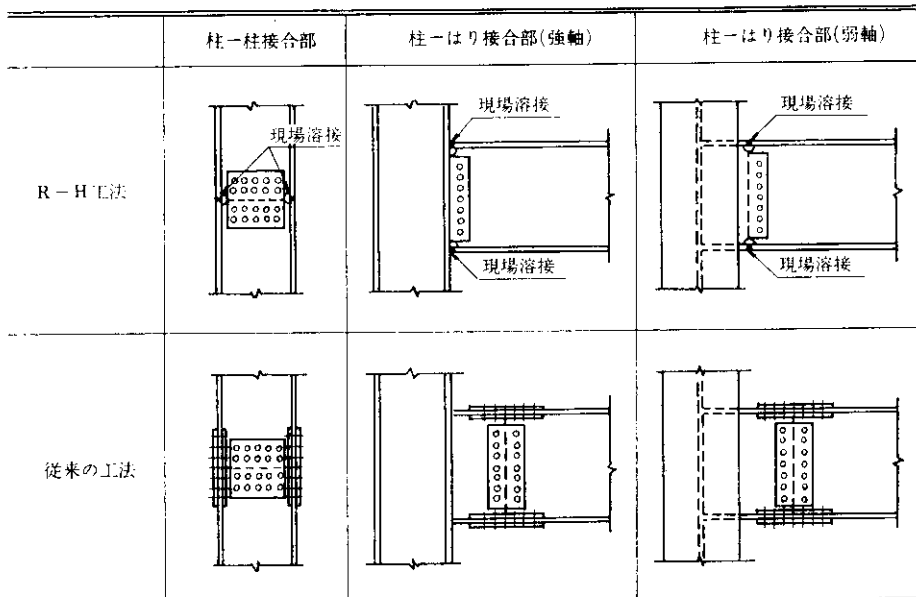


図 1 R-H工法と従来工法の比較

の鋼管杭の現場溶接工法である River-Joint 工法で得られた技術的ノウハウを発展させ、溶接手法よび継手形状に改良を加えたのちに、H形鋼に適用したところから、River-Joint-H 略して R-H 工法と名付けたものである。

図 1 に従来から行なわれているボルトやリベットによる接合方法と、R-H 工法による接合部の一例とを比較して示す。

このように R-H 工法の大きな特長は、H形鋼のウェブを高力ボルトで締め、フランジを現場溶接により接合することである。ウェブを高力ボルト締めとした理由は、建方用ボルトと兼用できること、ウェブの板厚はフランジのそれに比べ比較的薄いので、ボルトで十分接合できること、またウェブ接合のスプライスプレートやボルト頭は耐火被覆に影響を与えないことなどによる。

さて、ここで問題となるのは、フランジの現場溶接に際し、どのような条件で溶接を行えば確実な継手がより経済的に施工できるかということであり、これらについての技術的なノウハウを示したものが R-H 工法の第 2 の特長である。

R-H 工法は溶接方法によって大きく 2 つに分けられる。その一つは裏あて金方式 (Steel Backing, S B 方式) であり、他は裏波方式 (Fiver Backing, F B 方式) である (写真 1 参照)。



写真 1 R-H工法による継手のマクロ断面

また使用する溶接材料によって、手溶接による方法、ノーガス半自動溶接による方法およびガスシールド半自動溶接による方法に分けられる。図 2 に R-H 工法の溶接方法と、溶接材料による組合を示す。

R-H 工法では、建築物の規模、現場状況などにより、図 2 の組合せのうちどの方法を採用するかを設計の段階で決定する必要がある。溶接方法から考えると、鋼裏あて金を使った場合 (S B 方式) は、手軽で溶接技術も比較的容易であり、開先精度、溶接前および溶接中の管理を十分行なえば安全な継手が得られる。ただし、溶接後、ルート部の溶込み状況を外観検査だけでは簡単に判定することができない。これに比べて裏波溶接 (F B 方式) の場合は、溶接後の裏波状況により、ルート部が完全であるか否か一見して判明するので検査は容易である。

溶接手法の面からいえば、手溶接が手軽であるが、板厚が厚くなると能率的なノーガス半自動溶接やガスシールド半自動溶接を採用する必要がある。すなわち、半自動溶接は手溶接に比べ、単位時間当りの溶着金属量で 2~3 倍の能率を示すが、溶接機、電源、足場などの設備、溶接技術者の問題などから総合的に判断して、フランジ厚 30mm 以上の継手に対して経済的メリットがあるといえる。また F B 方式では、構造的に特に重要であるルート部の溶接に対し、初層を手溶接で確実な裏波溶接を行ない、信頼できる継手を作ることを特長としている。

F B 方式は、裏波形成材として当社製のファイバーバックングテープ (B F-1) と銅板を使用

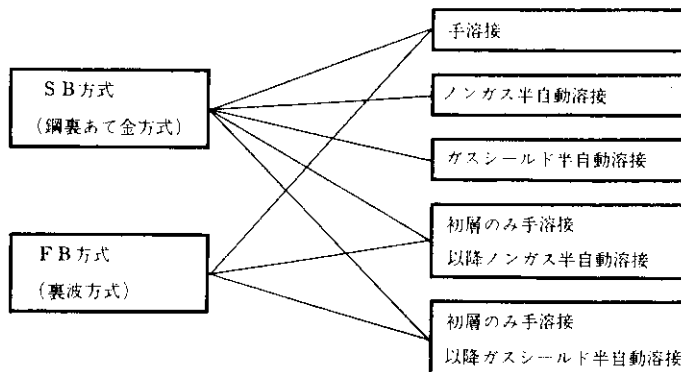


図 2 R-H工法の組合せ

し、低水素系溶接棒 KS-76 で溶接を行なうが、この方法により、容易に確実な裏波を形成することができる。写真2に裏波ビードの外観を示す。

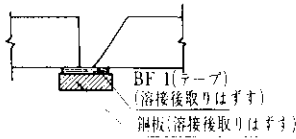


図3 FB方式



写真2 FB方式による裏波ビード外観の一例

3.2 R-H工法による溶接の手順

本工法による溶接の一般的手順を述べると以下のようなものである(図4参照)。

(1) 事前検査として、ルート間隔、目違いを記入した溶接事前検査シートを作成する。

(2) 後述する各柱実験データ(3.3~3.6項)を参照のうえ、溶接方法(たとえば初層をFB方式で行なうとか、手溶接で行なうなど)を吟味決定する。

(3) 前記溶接方法で確実な溶接を行ない得るよう、必要に応じて開先部の修正を行なう。

(4) 溶接管理者は、棒径、電流などの溶接条件を柱や梁の溶接箇所にはっきりと明記し、溶接作業の確実さを徹底する。

(5) 溶接管理者は溶接作業完了後、検査打ち合わせ要領に準拠した検査を行なって継手の合否を確認する。

3.3 柱一柱接合部

図5にR-H工法による柱一柱溶接継手の標準開先条件を示す。

本継手ではH形鋼のウェブをメタルタッチにすることにより、建方時の荷重を支えルート間隔を確保することに特色を有する。

柱一柱の接合部は横向溶接であることに加えて目違いが生じ易いため、柱一はり接合部に比べると一般に高度の技量が必要である。FB方式で

は、良好な裏波ビードを形成し得る開先条件の制限範囲が狭いので、FB、SB両方式の選択を適切に行ないうる十分な実験データが必要になってくる。

いいかえるとR-H工法は、一定の溶接方法ですべての柱一柱接合部の溶接を行なう工法ではなく、逆に、接合部の条件(たとえば溶接設備、溶接工の技量、開先形状、足場など)に最も適した溶接方法を選ぶことができることに特長を有する

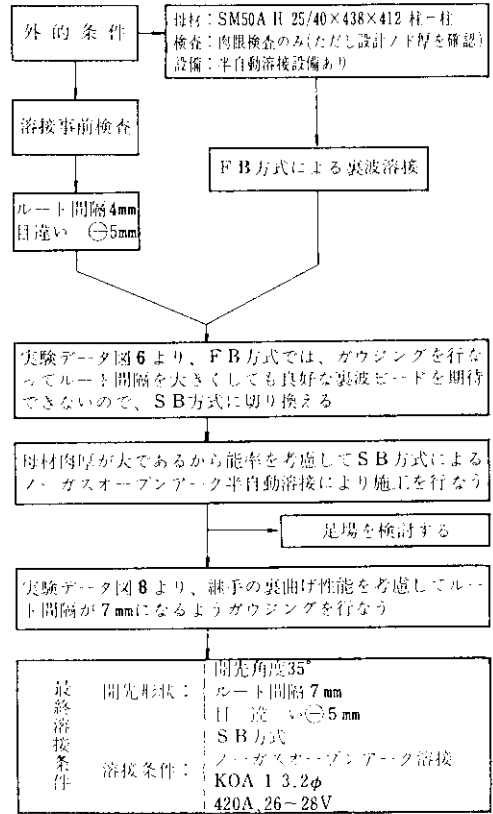


図4 R-H工法による柱一柱継手の溶接手順

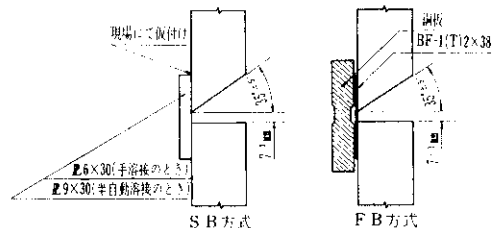


図5 R-H工法による柱一柱突合せ継手標準開先条件

体系的工法であるといえる。図4はその体系的手順を解説したフローチャートである。

さて次に本工法による柱一柱、柱一はり接合に共通する施工上のポイントともいべき各種の資料として溶込み、引張、曲げ、衝撃、硬さ、拘束ワレ試験などに代表される継手性能に関する実験結果について述べる

表1にこれらの試験に用いたH形鋼の化学成分および機械的性能を総括して示す。

3.3.1 溶込み

継手の健全性を保証する第一条件は、設計ノド厚を確保することであり、このためには、ルート部における溶込みが十分でなければならない。柱

一柱継手では、部材の製作や建方時の誤差によりルート間隔のバラツキや、上下材の芯ズレによる目違いを生ずる。

図6にルート間隔、目違いをパラメータとした場合のルート部における溶込み状況を示す。同図によればルート間隔は4mm以上、目違いは、SB方式で±6mm、FB方式で±4mmまで許容される。FB方式に用いる裏波形成材BF-1は、溶接時にアーク熱によって溶融し、裏波側のスラグを形成する特殊なグラスファイバー製の消耗パッキングであり、3回以上の使用は、銅板が

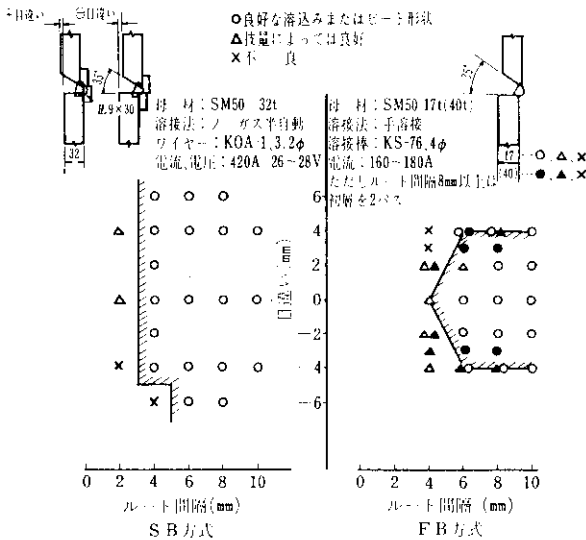


図6 ルート間隔、目違いと初層における溶込みまたは裏波ビード形状の関係

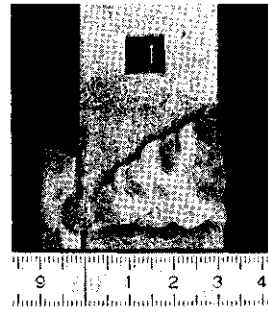


写真3 SB方式柱一柱継手マクロ断面の一例



写真4 FB方式柱一柱継手マクロ断面の一例

表1 H形鋼の化学成分および機械性能

規格	形状寸法	化学成分(%)							機械性能				備考
		C	Si	Mn	P	S	その他	Ceq	降伏点 (kg/mm ²)	引張強度 (kg/mm ²)	伸び (%)	曲げ	
S M50A	H-13/24 ×700×300	0.16	0.48	1.46	0.014	0.024	-	0.423	35	53	32	良	図表中には H-13/24と記す
"	H-18/28 ×414×405	0.17	0.46	1.42	0.015	0.022	-	0.427	37	53	33	良	" H-18/28 "
"	H 25/40 ×438×412	0.17	0.46	1.35	0.019	0.017	多少	0.417	39	56	36	良	" H-25/40 "
"	H 40/60 ×478×427	0.18	0.42	1.41	0.018	0.015	多少	0.434	36	57	35	良	" H 40/60 "

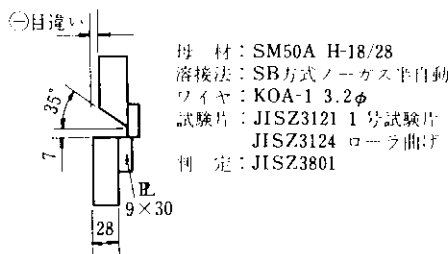
焼きつくこともあるのでできない。ルート間隔が大きくなると初層を数パス重ねなければならないから、FB方式によるルート間隔の上限値は、初層を2パスで完了できる範囲、すなわち10mmとなる。

ルート間隔11mm以上では初層の2パス目が完了したときに銅板をとりはずし、新しいBF-1を用いて再びセットして3パス目の溶接を行わなければならない。

これに対してSB方式では、アーク熱による溶け落ちが生じない限り、すなわち手溶接で6mm以上ノーガス半自動溶接で9mm以上の裏あて金を使用すれば、初層のパス数に制限をおく必要はなくなる。

表2 SB方式、柱一柱継手目違いと引張、曲げ試験結果

目違い (mm)	溶接工	引張強度 (kg/mm ²)	試験		裏曲げ試験
			破断位置		
+5	A	53	熱影響部		不良
		55	母材部		
+4	B	56	溶接部		良
		57	母材部		
+2	A	56	母材部		良
		56	溶接部		
-2	B	56	母材部		良
		56	母材部		
-4	A	55	熱影響部		良
		56	母材部		
-5	B	56	母材部		良
		58	母材部		



3-3-2 引張、曲げ強度

JISに準じた継手の引張、曲げ試験結果を 図7 ~ 9 図、および 表2 に示す。

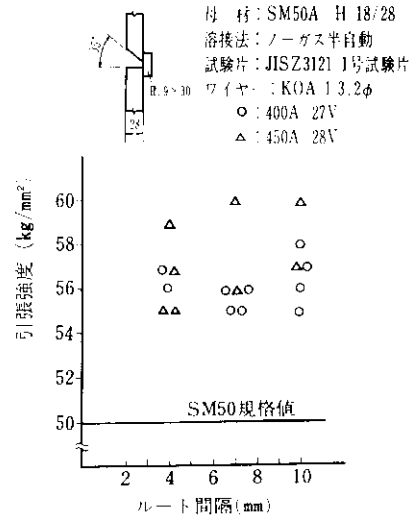


図7 柱一柱継手SB方式 ルート間隔と引張強度の関係

SB方式では、ルート間隔4mm以上、目違い±5mm以下において十分な引張強度を有することが認められる(図7, 表2)。しかし裏曲げ試験ではルート間隔7mm、目違い0mmという最も適切なる開先条件下においても一部JIS Z3801(溶接技量検定における試験方法ならびにその判定基準)の基準に不合格のものが生じた(図8)。これはノーガス溶接法が手溶接法などに比べ耐ブ

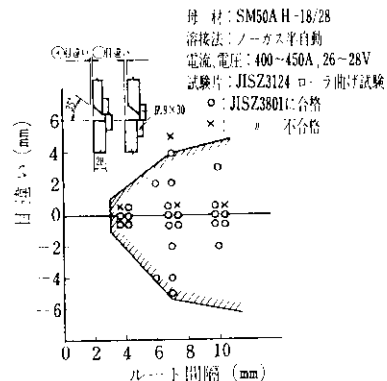


図8 SB方式柱一柱継手 ルート間隔、目違いと裏曲げ試験との関係

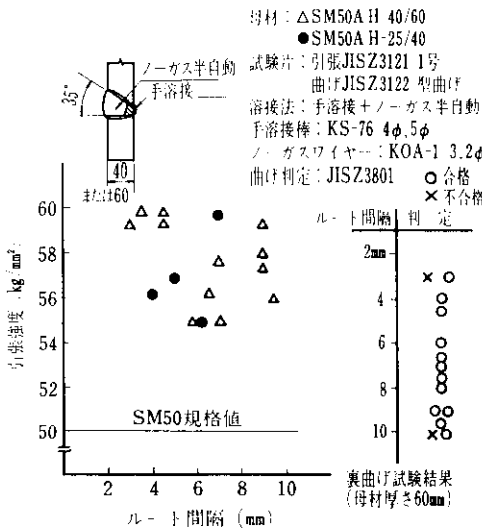


図9 FB方式柱一柱継手
ルート間隔と引張、曲げ強度

ローホール性に劣るためであるが¹⁾、これが原因で破断した試験片がないことを考慮すれば、実用上の延性を有するといえる。しかし裏曲げ試験において、切欠き効果を呈するほど目違いが大きくなると破断することもあるので、目違いが+4mm、-5mmを越えるようなときには、能率を犠牲にしても、初層を手溶接に切り換える必要がある。

FB方式では、ルート間隔7±3mmの範囲において、十分な引張強度を示している。裏曲げ試

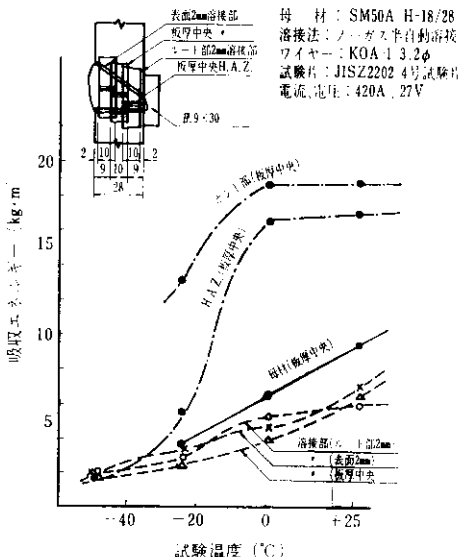


図10 SB方式柱一柱継手衝撃試験結果

験結果は裏波ビード形状すなわちルート部の継手延性という関係を意味するもので、溶接管理および検査に有効に適用できることになる。

3.3.3 衝撃、硬さ試験

試験結果を 図10～図12に示す。

ノーガス半自動溶接の溶接部における吸収エネルギーは、母材 (SM50A) のそれより低い値を示しているが (図10)、SM材B級鋼の規格値 (2.8kg·m (0°C)) よりは高い。他方、鉄骨建築に使用される50kg/mm²高張力鋼は、SM50Aが大部分であり²⁾、SM50Cは非常に少ない。したがって衝撃値の面からは、ノーガス溶接法による施工でも問題はないと考えられる。図11は、FB方式による継手の板厚方向の衝撃値の変動を調べた実験結果である。極厚および超極厚H形鋼になると、脆性破壊の危険性もあるので³⁾、溶接上重要なルート部においては、すぐれた衝撃特性が望ましい。本工法ではこの点を考慮して、初めの数層を手溶接で施工するため、同図に認められるごとくルート部では非常に良好な衝撃特性を示している。硬さ試験の結果 (図12) からは、特に異常な点は見られない。しかし、ルート間隔6mmの場合には板厚方向にほぼ同じような傾向の硬さ分布を示すのに対し、ルート間隔8mmの場合ではルート部においてかなり低下している。こ

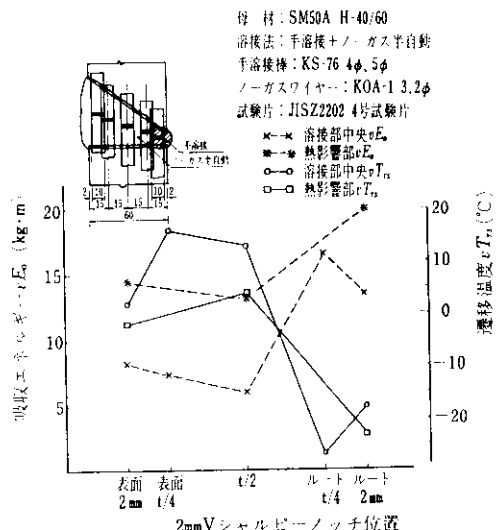


図11 FB方式柱一柱継手衝撃試験結果

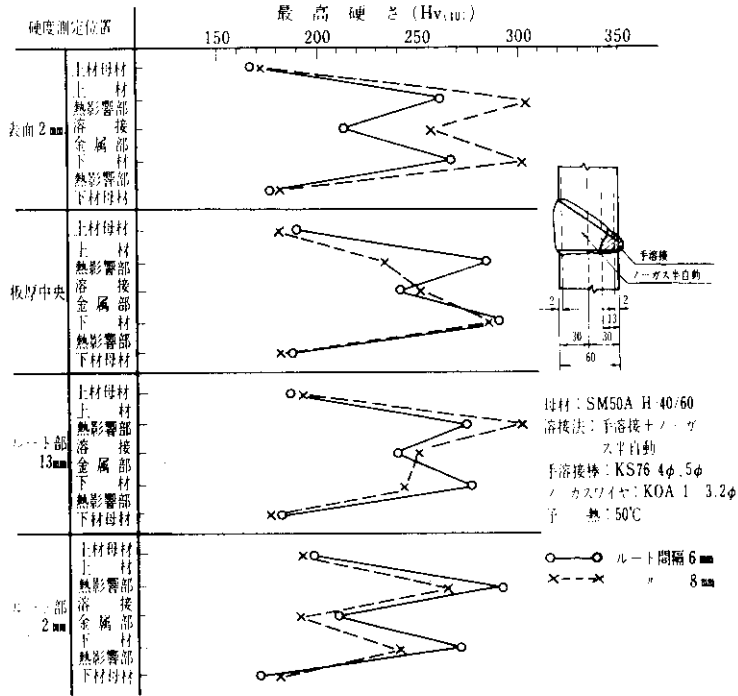


図 12 FB方式柱一柱継手ビッカース硬さ試験結果

これは本継手が裏波溶接であるため、初層の入熱が非常に大きい(約 50,000 Joule/cm)ことに起因するものと考えられる。

3.4 柱一はり接合部

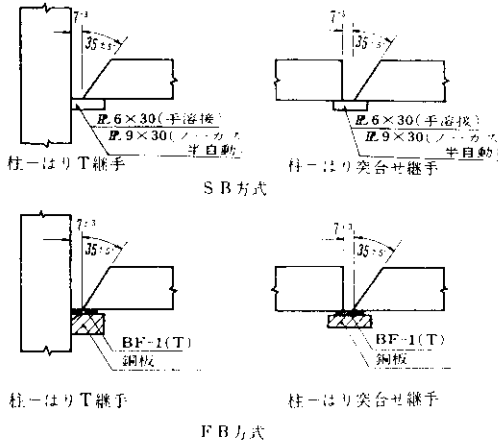


図 13 R-H工法による柱はり継手標準開先条件

柱一はり接合部の標準開先条件を 図 13 に示す。

柱一はり接合には、H形鋼の強軸方向のT形突合わせ継手と弱軸方向のレ型(またはV型)突合わせ継手とがある。高層鉄骨建築における強軸方向の柱一はり接合部はほとんどが剛節構造であるから、T形突合わせ継手が最も多く現出する。

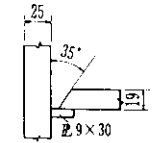
したがって本報告では頻度が高く、技術的にも問題が多いT型突合わせ継手についてのみ詳述することとする。

3.4.1 溶込みおよび裏波ビード形状

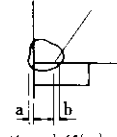
SB方式によるノーガス半自動溶接では、ルート間隔が4mm以上、FB方式では4~10mmの範囲においてそれぞれ確実な溶込みおよび裏波ビード形状が期待できる(表 3,4 参照)。ただし、この実験は、はり上フランジ部の継手を対象としたものであるから、下フランジ部の継手にそのまま適用することはできない。下フランジに関して

表 3 S B方式柱一はりT継手, ルート間隔と初層の溶込み

電流 (A) 電圧 (V)	運 棒	技量	ルート間隔 (mm)					
			0	2	4	7	8	9
400 27	ストレート	A	×	×	○	○	◎	
		B	×	×	◎	○		◎
450 28	ストレート	A	×	○	◎	◎	◎	
		B	×	○	◎	◎		◎
	ウィーピング	A				○	◎	
		B				◎		◎



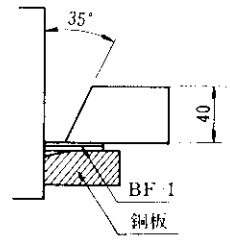
溶接法：ノーガス半自動
ワイヤー：KOA-1 3.2φ
溶接速度：25~35cm/min



× a, b < 0(mm)
○ 0 ≤ a, b ≤ 1
◎ 1 < a, b

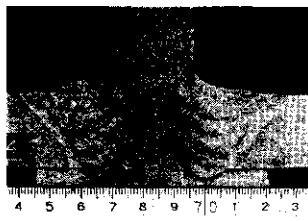
表 4 F B方式柱一はりT継手, ルート間隔と裏波ビード形状

棒径	バックング方式	初層パス数	ルート間隔 (mm)							
			3	4	5	6	7	8	9	10
4φ	銅板	1	△	○						
"	BF-1銅板	1	×	○	○	◎	○	△		
"	"	2					○	○	○	○
5φ	"	1				○	◎	○	○	
"	"	2							○	○

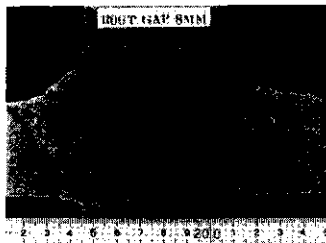


溶接法：手溶接
4φ：140-180A
5φ：160-220A

◎ 裏波ビード形状非常に良好
○ " 良好
× " 不良



S B方式



F B方式

写真 5 柱一はり継手マクロ断面の一例

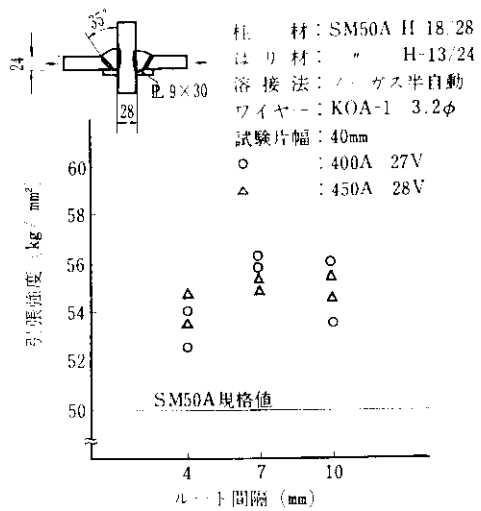


図 14 S B方式柱一はりT継手のルート間隔と引張強度の関係

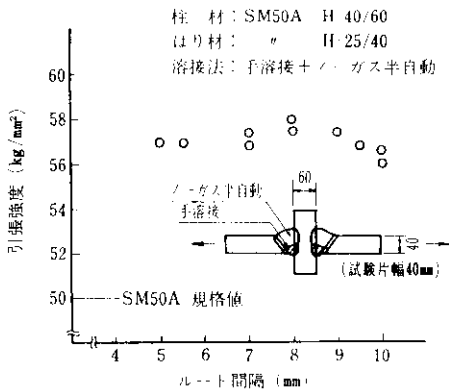


図 15 FB方式柱-はりT継手のルート間隔と引張強度の関係

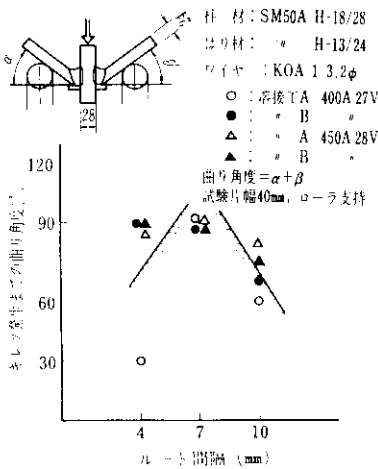


図 16 SB方式柱-はりT継手のルート間隔と十字曲げ試験におけるキレツ発生角度

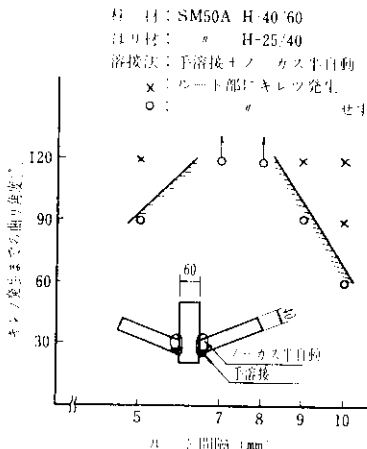


図 17 FB方式柱-はりT継手のルート間隔と十字曲げ試験におけるキレツ発生角度

は、3・5 で述べる。

3.4.2 引張、曲げ強度

T型突合わせ継手の強度を調べる試験法はまだ、JIS に規定されていないので、便宜上十字突合わせ継手に試験片を成形し、JIS Z3131 (すみ肉溶接継手の引張試験方法) および JIS Z3134 (T形すみ肉溶接継手の曲げ試験方法) に準じた試験法、いわゆる余盛、裏あて金つきの試験を行なった。引張試験の結果については、図 14, 15 からわかるようにSB, FB両方式とも十分な強度を有するといえる。

十字裏曲げ試験の結果 (図 16, 17) からは、FB方式の方が、SB方式よりもキレツ発生までの角度が大きく継手延性にすぐれていることが判明した。



写真 6 FB方式柱-はり継手十字裏曲げ試験片の一例

また、この試験から裏曲げ性能は、ルート間隔 7 mm を頂点とした三角分布を示すことも判明した。この三角型分布の頂点は試験片の幅や板厚によって異とも考えられるが、標準ルート間隔を推定する一応の目安には十分なりうる。

3.4.3 衝撃、硬さ試験

衝撃試験の結果 (図 18, 19) は、柱-柱継手の場合 (図 10, 11) とほぼ同じ傾向を示し、ここでも本工法による継手強度の確実性が立証された。

板厚の大きい柱フランジの母材熱影響部最高硬さは、板厚が小さく、かつ開先をとってあるはりフランジのそれよりもかなり高いので (図 20 参

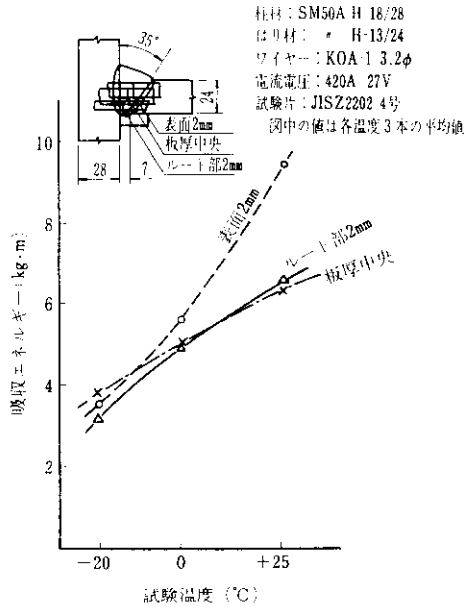


図 18 SB方式柱-はりT継手衝撃試験結果

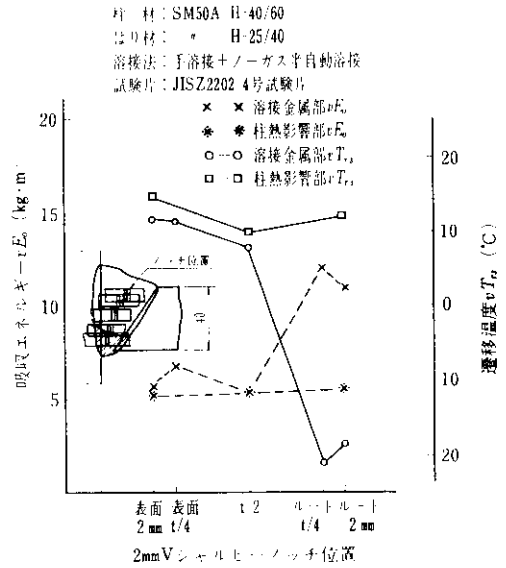


図 19 FB方式柱-はりT継手衝撃試験結果

照), 柱の子熱は十分に行なわれなければならない。

また、この予熱は柱材ルート部における溶込みをよくし、FB方式では裏波ビードのオーバーラップをなくす上にも有効な手段である。また、ルート間隔に多少の変動があっても、ルート部における母材熱影響部の最高硬さはかなり低くなっている。その理由はすでに3.3.3に述べたとおりであり、FB方式はルート部における母材熱影響部の最高硬さを減ずる対策として、かなり有効な手段であるといえる。

3.5 柱-はり接合部におけるスカーラップ

柱-柱接合はウェブがメタルタッチで、かつ、横向溶接であるため、鋼裏あて金や銅板をフィレット部の曲率に合うように加工し、これをフランジに取付ければ、ウェブのスカーラップを設ける必要はない。しかし、柱-はり接合部では形状的にそのようなことは、不可能なので、必ずスカーラップを設けなければならない。スカーラップを設ける理由は、上フランジ部で、裏あて金または銅板を通すためであり、下フランジ部では溶接線の中央にあるウェブの隔壁を取り除いて溶接を行なうためである。したがっ

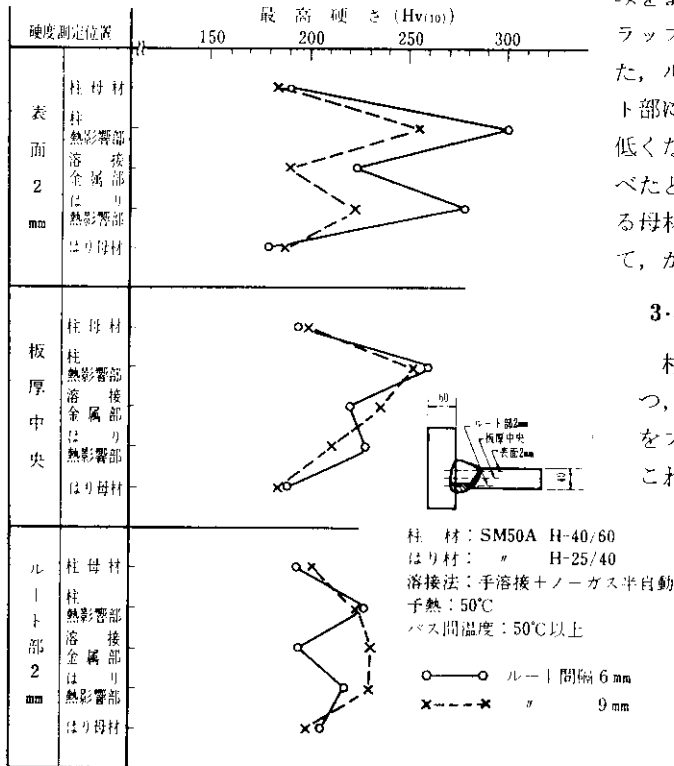


図 20 FB方式柱-はりT継手ビッカース硬さ試験結果

て、上フランジ部のスカールラップは裏あて金または銅板の形状により、簡単に決定できるが、下フランジ部のスカールラップは溶接方法によって異なる。図 21 および表 5 はフランジ幅 300mm の H 形鋼に長さ 40mm のエンドタブを取り付けたはりをを用い、スカールラップ形状を種々変化させた場合のノーガス S B 方式による継手 X 線試験結果である。

図 21 はスカールラップを介して連続して溶接した場合、表 5 は、溶接線の中央 (ウェーブ近傍) から両側に振り分けて溶接した場合の試験結果であるが、いずれの方法でも良好な成績が得られなかった。交流垂下特性のノーガス半自動溶接法は、アークのスタートが悪いため⁵⁾、ビードの重ねめ (ビード継目) に欠陥が生じやすい。また、溶接工が位置する側と反対側のフランジ突縁部の溶接では、ワイヤーの突出しが異常に長くなったり、

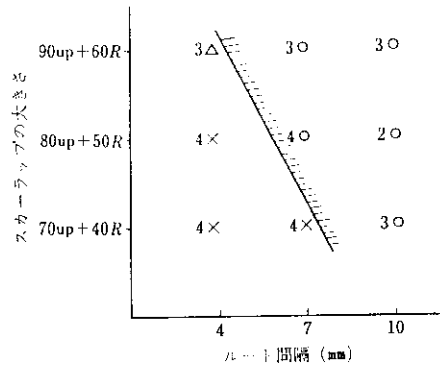
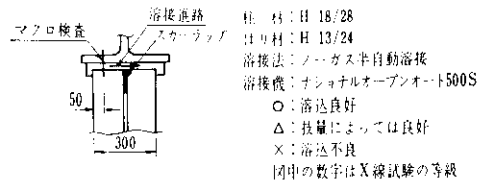
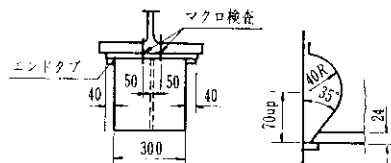


図 21 S B 方式柱一はり継手の下フランジ部連続溶接の場合のスカールラップ形状と X 線試験結果

表 5 S B 方式柱一はり T 継手、ノーガス半自動溶接による下フランジ部振り分け溶接の場合の検査結果

溶接条件			マクロ検査			X線検査		判定	
ルート間隔	電流電圧	溶接工	左欠陥	右欠陥	溶込	溶込	欠陥	1種	2種
4	380A 26V	A	SI 1.0+0.5+0.7	なし	◎	◎		1	1
"	"	B	SI 3.0+0.5	SI 1.5+1.0+1.0	×	○		1	3
"	420A 27V	A	SI 1.5+1.5+0.7 +0.5+0.5	SI 2.0+2.0 BH 0.7φ×2ヶ	◎	○		1	2
"	"	B	SI 4.0+0.5×7ヶ LF 2.0	SI 1.5×2 + 1.0×2	×	○		1	3
"	450A 29V	A	SI 0.5	なし	○	○		1	1
"	"	B	SI 1.0+3.0+2.0 LF 3.0+3.0	SI 1.0	×	◎		1	4
10	420A 27V	A	SI 1.0	SI 1.0	◎	◎		1	1
"	"	B	SI 2.0+3.0 LF 2.0	SI 1.0	◎	○		1	3
"	450A 29V	A	なし	SI 5.0 LF 1.5	◎	×		1	3
"	"	B	SI 3.0+2.0+1.0 +1.0×2ヶ	SI 4.5+5.0 +1.0×5ヶ	◎	○		1	4

◎ 溶込非常に良好, ○ 溶込良好
 × 溶込不良
 SI : スラッグのまき込み
 BH : ブローホール
 LF : パス間の不溶着



溶融池の状況を観察しにくいこともあり、正確な溶接作業を期待しがたい。

したがってルート部の第1層目のように最も重要な溶接部を、しかも不自然な姿勢で行なう溶接法として、ノーガス半自動溶接法の採用は当然困難になってくる。

このような理由から R-H 工法では、特に技量のすぐれた溶接工が溶接を行なう場合を除き、下

フランジ部第1層目の溶接は手溶接で行なうことを原則としている。

図 22 はスカーラップの標準形状である。

3-6 溶接部の割れ試験

裏波溶接法は一般に、割れに対して敏感であり、また使用する鋼材も50kg/mm²高張力鋼の厚板であることを考慮して、窓枠型拘束割れ試験を

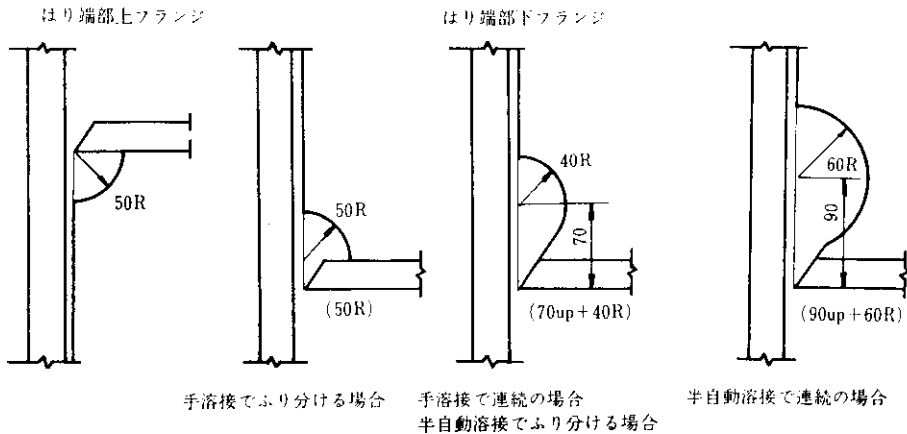


図 22 R-H工法によるスカーラップの標準形状

表 6 FB方式における窓枠型拘束ワレ試験結果

形状	予熱	溶接条件				検査結果	
		パス順	使用棒	電流 (A)	入熱 (Joule/cm)	検査箇所	欠陥
柱一柱 (横向L型) H-40/60 開先角 35° ルート間隔6mm	なし 室温=25°C	1	K S-76 4φ	170	50,000	裏波ビード	なし
		2-1	"	180	23,000	裏ビード切削	ビード継目ワレ
		2-2	"	"	"	2 mm 切削	" ヨコワレ
		3-1	"	"	24,000	4 mm "	ビード継目ワレ
		3-2	"	"	23,000	6 mm "	なし
		3-3	"	"	"	表面ビード	なし
	100°C	1	K S-76 4φ	170	58,000	裏波ビード	なし
		2-1	" 5φ	250	17,000	裏ビード切削	なし
		2-2	"	"	21,000	2 mm "	なし
		3-1	"	"	24,000	5 mm "	なし
		3-2	"	"	28,000	表面ビード	なし
		50°C	1	K S-76 4φ	170	50,000	裏波ビード
2	"		180	32,000	裏ビード切削	ピンホール2ヶ	
3-1	"		"	16,000	2 mm "	ピンホール2ヶ	
3-2	"		"	"	5 mm "	なし	
4-1	"		"	17,000	7 mm "	なし	
4-2	"		"	"	表面ビード	なし	

行なった。結果を表6に示す。

割れ発生防止予熱温度は、FB方式柱一柱継手で100°C以上、柱一はり継手で50°C以上である。鉄骨建築の現場溶接では、H形鋼の場合、溶接線について1方向拘束であるのに対し、窓枠型拘束割れ試験は2方向拘束であり⁶⁾、明らかに後者の方が、拘束度は大きい。したがって前記予熱温度は、きわめて安全な数値であるといえる。

4. R-H工法を用いた架構の実大実験

4.1 実験概要

R-H工法は、現場溶接工法であり、屋外工事の作業性およびその構造性能を確認しない限り、実験室的各種試験結果だけでは説得力に欠ける点が多く、ここに屋外実験を加え万全を期することにした。

本実験は、実物大のフレームを屋外に組み、まず、その作業性をチェックし、ついで、完成されたフレームに水平荷重時と同等の応力状態を与えて、接合部の力学的挙動を測定し、その安全性を確認することを意図したものである。

試験体には、鉄骨建築でもっとも普遍的な中層ビルを想定し、その下層部分を取り出したものを選定した。試験体形状は図23に示すとおりであるが、実験の目的に沿うべく、現場溶接箇所を、柱一はり4箇所、柱一柱1箇所となるように作成した。図に見られるように、柱は、左右で断

面サイズが著しく異っているが、右柱は加力機構であり、中間にジャッキを挿入の上載荷するようにし、力学的諸性状に関する測定は実際建築に対応する断面の大きな左柱とその接合部およびはりに関して行なった。

接合部の溶接は、ウェブの高力ボルト (F9T 22mmφ) 本締め後、ノーガス半自動溶接 (K0A-1 3.2mmφ) を用いて行なった。溶接条件は表7に示すとおりで、3.3、3.4に述べたようにR-H工法の標準条件である。

表7 溶接条件

溶接条件	柱一柱接合部	柱一はり接合部
ルート間隔(mm)	7	7
開先角度(°)	35	35
電 流 (A)	400	400
電 圧 (V)	25~27	25~27
平均パス数(回)	12	10

溶接作業性に関しては、溶接作業に要する足場の位置を検討するほか、機器運搬などの準備時間や、溶接施工時間を測定し、さらに、電流、電圧の変動や、風力など屋外溶接が作業性に与える主要素の影響を個々にチェックした。

載荷試験は、200t油圧ジャッキによる一方向増加荷重によって行ない、各荷重ごとにダイヤルゲージとワイヤーストレインゲージを用いて測点の変位と歪みとを測定した(写真7)。

また、溶接により部材を接合すると、収縮変形と溶接残留応力が発生するが、とくに収縮変形に対しては形状寸法に直接影響を及ぼすことから、

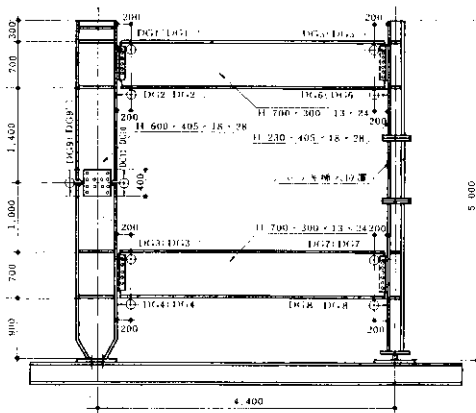


図23 試験体

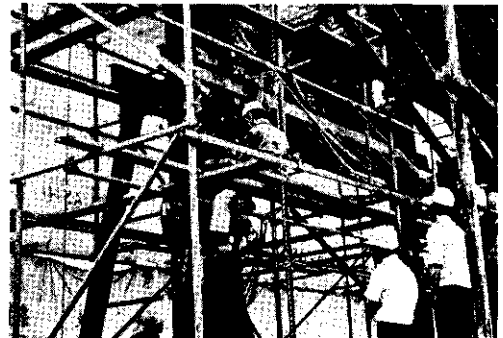


写真7 実大載荷試験

あらかじめこれを考慮に入れて工場製作を行なう
 必要があり、同時に現場建て方、溶接順序などにも
 十分注意して施工しなければならない。したが
 って収縮変形に関する定性ならびに定量的な把握
 をしておく必要があり、この目的のために、フレ
 ームの接合部を溶接した際、ダイヤルゲージを用
 いて溶接に起因する柱およびはり部材の収縮変形
 量を測定し、さらに载荷試験後溶接残留応力をも
 併せて測定し、資料の充実を図った。図 23 に溶
 接収縮変形量を測定するためのダイヤルゲージ取
 付位置が示してある。

4-2 実験結果および考察

(1) 作業性

施工効率と溶接結果とが、実験室と比較しても
 全く遜色のないことを主たる目的として、溶接作
 業のための足場位置を実際に種々検討したが、総
 合的に判断して下記のような位置が最適である
 との結論をえた。すなわち、

1) 柱-柱接合部溶接のための足場は、溶接部
 から約 1 m 程度低く設置するのがよく、この場合
 通常の接合部位置からいって下階の梁を利用でき
 る場合が多い。

2) 柱-はり接合部の上フランジ溶接に対して
 は、特に足場を設ける必要はなく、はり自体を利用
 して差し支えない。

3) 下フランジの溶接では、溶接部より約 1 m
 下った位置に足場を設定する。

次に、風力に関し、溶接時の風速を風速計で測
 定したが、6月の晴天時最大 9 m/sec であり、こ
 の程度の風速では溶接欠陥は発生せず、良好な結
 果がえられた。

(2) 接合部の力学的挙動

溶接完了後のフレームについて、载荷実験を行
 なったが、理論計算に際しては 図 24 のように
 モデル化のうえ、次のようにして耐力と変位を算
 出した。

右支点 F はローラーで、左支点 A は半固定と見
 なされるが、便宜上、A をピンと固定の両条件で
 解析し、実測値の吟味の参考にした。解析結果
 は、いずれの場合でも耐力は接合部 C で決定さ
 れ、载荷点の荷重を P とすれば、はり端部のモー

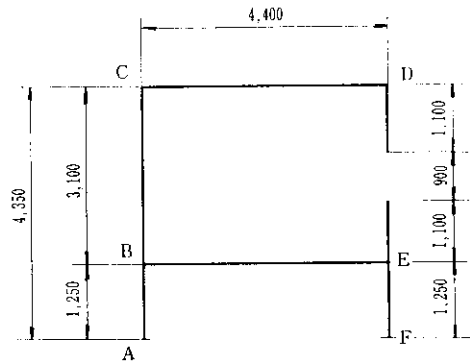


図 24 フレームのモデル

メント (M_{CD}) とせん断力 (Q_{CD}) は、

$$M_{CD} = 44P \text{ (t}\cdot\text{m)}$$

$$Q_{CD} = 1.0P \text{ (t}\cdot\text{m)}$$

柱端部のモーメント (M_{CB}) と軸力 (N_{CB}) はそ
 れぞれ

$$M_{CB} = 4.4P \text{ (t}\cdot\text{m)}$$

$$N_{CB} = 1.0P \text{ (t}\cdot\text{m)}$$

となる。

はりおよび柱の断面性能を用いて、各々の耐力を
 求めれば、はり端部に対して、

$$\text{降伏耐力: } P_{y(\text{beam})} = 40.5 \text{ (t)}$$

$$\text{終局耐力: } P_{p(\text{beam})} = 42.0 \text{ (t)}$$

柱端部に対して

$$\text{降伏耐力: } P_{y(\text{column})} = 56.2 \text{ (t)}$$

$$\text{終局耐力: } P_{p(\text{column})} = 66.0 \text{ (t)}$$

となる。

また、接合部 C のパネルゾーンについて境界条件
 を 図 25 のように定め、応力函数を

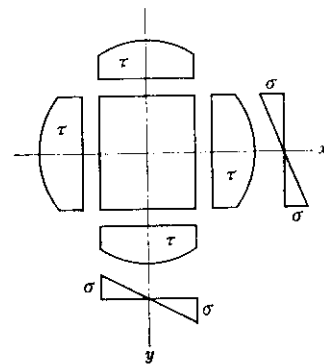


図 25 境界条件

$$F = \frac{A}{3 \cdot 2} x^3 y + \frac{B}{3 \cdot 2} x y^3 + \frac{C}{3 \cdot 2} x^3 + \frac{D}{3 \cdot 2} y^3 + E x y$$

に選んで、 σ_x , σ_y , τ_{xy} をまず算出する。

結果を Mises の降伏条件式

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \tau_{xy}^2}$$

に代入して耐力を計算すれば、けっきょく次の結果をうる、すなわちパネルゾーンに対し、

降伏耐力: $P_{y(\text{panel})} = 23.6 \text{ (t)}$

終局耐力: $P_{p(\text{panel})} = 33.8 \text{ (t)}$

となる。

以上の計算結果を比較することにより、フレームの耐力はパネルゾーンで決定されることが了解され、次の値となる。

降伏耐力: $P_y = 23.6 \text{ (t)}$

終局耐力: $P_p = 33.8 \text{ (t)}$

なお、変位の計算値は、当社の“骨組解析のための汎用プログラム (SAFS)” を利用して算定した。

実験結果は計算値とよく合致し、本工法の力学的合理性が明確に立証されたことを確認しえたが、ここに一例としてD点の鉛直方向の荷重—変形曲線を 図 26 に示す。

同図にも認められるように、変形曲線の実測値

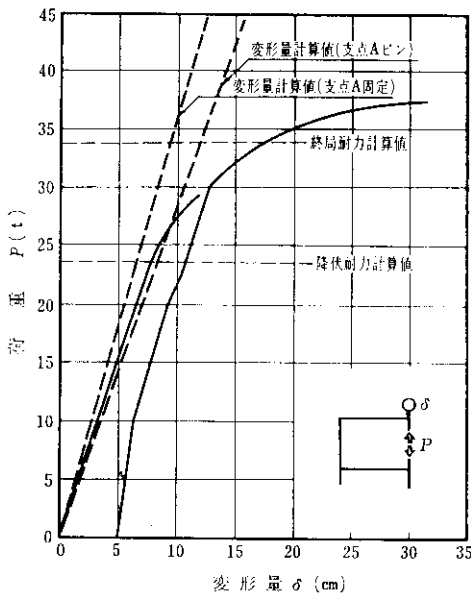


図 26 荷重—変形量曲線

は支点Aをピンおよび固定としたそれぞれの理論値の中間に位置しており、試験体における支点Aの半固定効果も明瞭に把握されるのみならず、耐力に関しても、実験値と算定値とが良好な一致を示しており、R-H工法が力学的に正確な接合部を提供していることがわかる。

以上の実大実験より得られた結果を総括すれば、屋外において実際の建築物を現場溶接する場合でも、安全かつ作業性のよい足場を設け、適切な溶接条件を選定するなど施工の完備に留意すれば、欠陥のない完全な溶接継手がえられ、また、載荷試験の結果に照らしても、R-H工法による接合部が十分な耐力と剛性を有することが確認された

(3) 溶接による収縮変形および残留応力

溶接による収縮変形量の測定結果を 表 8 に示

表 8 溶接部の収縮量

接合ヶ所	D.G.番号	収縮量 (mm)	平均 (mm)	
柱—はり 接合部	上フランジ GL=200mm	1	0.66	0.80
		1'	0.79	
		3	0.72	
		3'	0.80	
		5	0.60	
	下フランジ GL=200mm	5'	1.15	1.00
		7	0.69	
		7'	0.96	
		2	0.98	
		2'	0.85	
柱—柱接合部 GL=400mm	4	1.15	0.17	
	4'	1.07		
	6	0.99		
	6'	1.06		
	8	1.05		
	8'	0.88		
柱—柱接合部 GL=400mm	9	0.19	0.17	
	9'	0.16		
	10	0.17		
	10'	0.15		

しているが、柱一はり接合部で0.80~1.00mm、柱一柱接合部で平均0.17mmの収縮変形が認められた。

また、当社の11階建て圓生アパートにR-H工法を採用して施工した際に、スパン全長を対象として柱一はり接合部の収縮変形量を測定したが(写真8)、1スパン当たり両端溶接で1.5mmから2.0mmであり、前述の測定値が一端溶接であるところから、その2倍値と比較すればきわめて良く一致している。なお、溶接収縮変形量に関しては2、3の報告^{7),8)}があるが、ほぼ同じ値を示している。

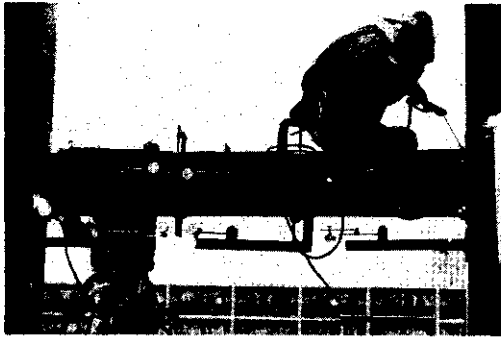


写真8 溶接収縮量の測定

次に、溶接による残留応力であるが、そもそも拘束のない板の溶接でもビードの中心線付近はかなり大きな値となることが認められており、今回のようにウェブを高力ボルトで拘束している場合はさらに大きな残留応力が発生していると考えべきである。

したがって、その拘束効果を考察する目的から、フレームの載荷試験終了後、載荷中の応力がほとんど加わらなかった右柱上部の接合部における梁端部にワイヤーストレインゲージを貼付し、ウェブのハイテンションボルトによる拘束を開放して歪みの変動を測定した。結果を図27に示すが、溶接部中央で最大14.7kg/mm²となり降伏点の約40%の拘束による引張残留応力が測定された。

もちろん、正確に溶接による接合部の全残留応力を考察するためには、拘束のない板のT継手における溶接残留応力に加えて単純に本値に累算すべき性質のもでもなく、今次のごとく単一のパラメーターでの測定とは異なり、より詳細かつは

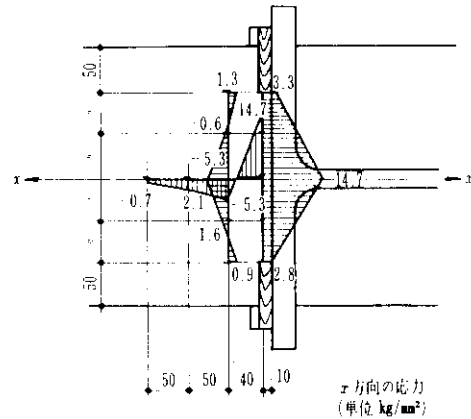


図27 残留応力分布

多数パラメーターを包含する実験を必要とすることはいうまでもないが、少なくとも本実験により、R-H工法における高力ボルトの拘束効果の一応の目安が得られたものと認めてよく、むしろ高力ボルトに作用する付加外力として別途把握すべきかとも思考するが、いずれも今後に残された興味ある課題といえよう。

5. 溶接によるはり部材の温度上昇

近年、高層建築物の量産工法として、鉄骨ばりを内蔵したPC版を柱に現場溶接を用いて接合する方法が採用されるようになり、当社のK-S工法もその一例である。かかる工法においては、溶接によって鉄骨ばりの温度上昇がコンクリートに悪影響を与え、これが割れや剝離の原因となることのないよう考慮することはもちろんであるが、果たしてどの程度の温度上昇となるかについてまず実測により確認するのが先決問題と思われる。

この目的のため、溶接によるはり部材の温度上昇を室内実験で測定し、その分布状態を図28に示した。本実験では、はりのフランジ幅を30cmとし、板厚を16, 19, 24mmの3種類に変化させ、ノーガス半自動溶接を行なったのち、時間経過に伴う梁フランジ表面の中央部における温度分布をサーモカップルおよび温度チョークを使用して測定した。

溶接時の母材温度は1,500°C以上になるといわ

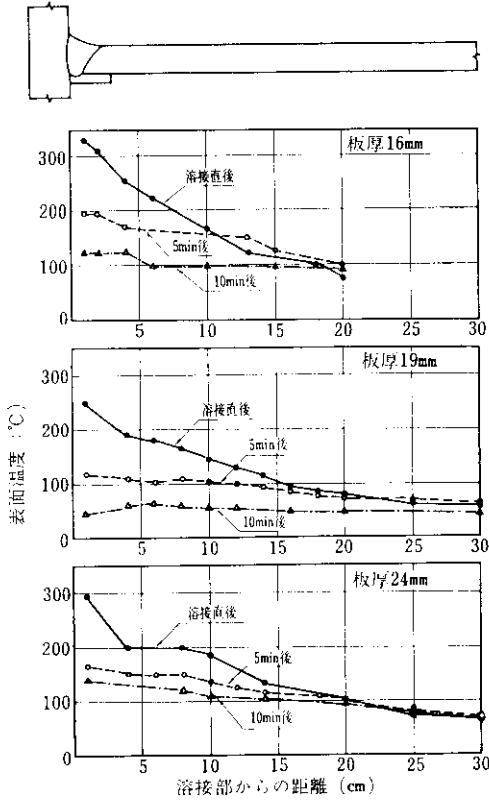


図 28 溶接によるはり部材の温度分布

れているが⁹⁾、実験結果によれば、溶接直後数秒で溶着金属表面温度は 300~350°C まで低下することが確認され、また、溶接部から 20cm 離れた箇所では、たかだか最高100°C位の温度上昇しか認められなかった(図 28 参照)。一般に、溶接施工に必要な空間として、梁の端部から少なくとも 20 cm 位はコンクリートを鉄骨に被覆しないのが普通であることから、このような場合には溶接による鉄骨ばりの温度上昇はコンクリートに何ら悪影響を及ぼすことはないと考えて良いといえる。

6. 非破壊検査

溶接部の非破壊検査として一般に行なわれているのは、外観検査、浸透探傷試験、放射線透過試験および超音波探傷試験である。このうち最近多用されるようになったのが超音波探傷試験法であり、これは探触子内に内蔵された水晶の発振子より超音波を発振させ、欠陥からの反射波をとらえ

てブラウン管上に映像として写し出すものである。

しかし、超音波探傷試験方法は未だ研究途上であり、その信頼性に関する十分な資料はないと言わざるをえない状態である。超音波探傷法に関し、主としてX線試験との比較検討を行なって、その信頼性を確認するための実験を実施した。

実験は 2 項目よりなり、第 1 は試験片による溶接継手を用いてのラボラトリーテストであり、第 2 は実際の鉄骨建築現場において溶接後の接合部を対象としたフィールドテストである(写真 9)。実験方法は、同一対象物に対して超音波探傷試験と X 線試験の両者を行ない、欠陥の有無を確認、比較するとともに、超音波の判定基準 (NDIS-2404-70) と X 線判定基準 (JIS Z 3104-1968) の等級分類の比較を行なった。

図 29 に試験片の溶接継手形状を示し、図 30 に実際の鉄骨建築物の継手形状を示している。試験片による両試験法の比較を多数行なったが、そのうちの数例を参考として図 31 に示す。また、

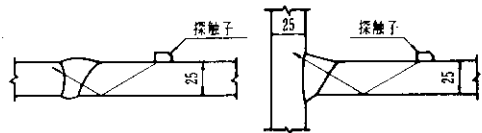


図 29 試験片の継手形状および探傷方法

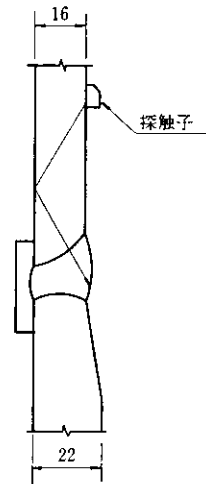


図 30 実際の建築物の継手形状および探傷方法

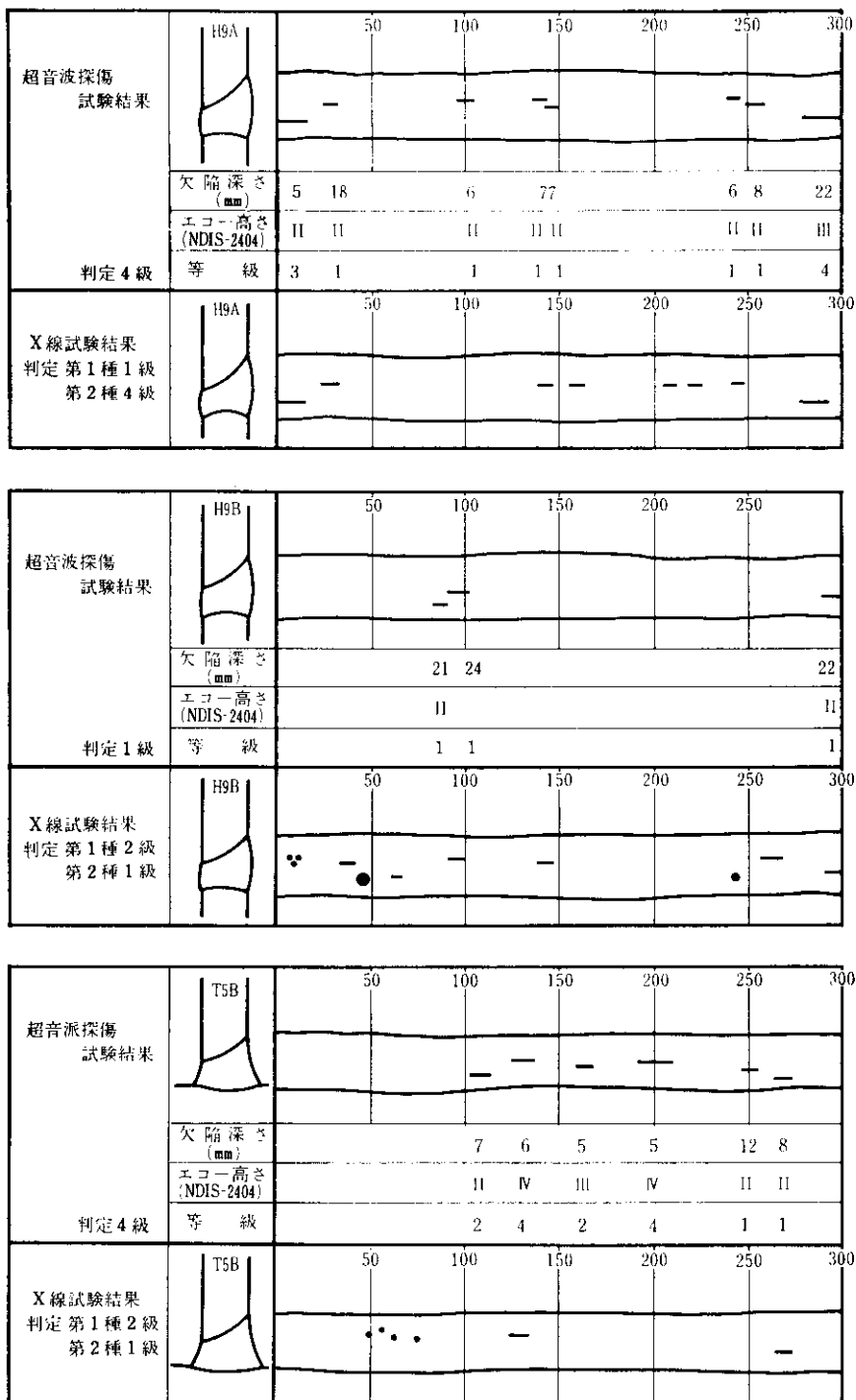


図 31 試験片による探傷結果の例

表 9 実際建築物の探傷結果

検査ヶ所	超音波探傷結果	X線結果		検査ヶ所	超音波探傷結果	X線結果	
		第1種	第2種			第1種	第2種
A 1-1	2	2	2	B 1-1	1	1	1
2	1	1	1	2	1	2	4
3	1	1	1	3	1	1	1
4	1	1	1	4	1	1	1
A 2-2	1	1	2	B 2-1	1	2	1
3	1	2	1	4	1	1	1
A 3-2	1	1	1	B 3-1	1	3	4
3	1	1	1	4	1	1	1
A 4-2	1	2	1	B 4-1	1	1	1
3	1	1	1	4	1	2	1
A 5-2	1	1	3	B 5-1	1	1	1
3	1	3	1	4	1	2	1
A 6-2	1	1	1	B 6-1	1	1	1
3	1	1	3	4	1	1	1
A 7-2	1	1	1	B 7-1	1	2	1
3	1	2	1	4	1	1	1
A 8-2	1	1	1	B 8-1	2	2	4
3	1	4	1	4	1	2	1
A 9-2	1	1	1	B 9-1	1	2	1
3	1	2	2	4	1	2	1
A 10-2	1	1	1	B 10-1	2	1	1
3	1	1	1	4	1	1	1
A 11-2	1	1	1	B 11-1	4	2	1
3	1	1	1	4	3	1	1
A 12-2	1	2	3	B 12-1	1	2	2
3	1	3	1	4	3	1	1
A 13-2	1	2	1	B 13-1	1	2	1
3	1	1	1	4	1	2	1
A 14-2	2	2	1	B 14-1	1	2	1
3	2	1	3	4	1	1	1
A 15-2	1	1	1	B 15-1	1	1	1
3	1	1	1	4	1	1	1
A 16-1	1	1	1	B 16-1	1	1	1
2	1	1	1	2	1	1	1
3	1	1	1	3	2	2	1
4	1	1	1	4	1	2	1

表 9 は実際の建築物の等級分類結果である。

これらの実験結果を総合して、次のような結論がえられた。

(1) 超音波探傷とX線探傷の試験結果は、欠陥の位置、大きさとも一般的にほとんど一致しない。これは超音波で探傷しやすい欠陥とX線に正

確に検出される欠陥とは種類が異なるためと考えられる。したがって、NDIS-2404-70に従った超音波探傷の判定結果とJIS Z3104-1968に従ったX線試験の判定結果の等級を比較することは現段階では意味がなく、両者の結果を総合的に評価することが必要となる。

(2) NDI (日本非破壊検査協会) の基準では、NDI 1級以上の資格を持つ技師が超音波探傷するように定められているが、このような資格者といえども、常時結果が合致するとは言えず、この点は、現段階での超音波検査法の弱点の一つに数えられる。

(3) さらに、測定条件の良否によっても結果が異なる可能性もあり、実験室で注意深く探傷する場合と、現場の悪条件下の探傷とでは欠陥検出精度にかなりの相異が認められる場合も多く、このような事実から、同一現場でも足場の良し悪しや探傷にかかる時間の長短によっても異なった検査結果がえられることに留意する必要がある。



写真 9 超音波探傷検査

7. R-H工法の施工

R-H工法の施工に際して、特に留意すべき事項を列記すれば以下のごとくである。

(1) 鉄骨建て方に当たっては、目標ルート間隔を確保しさらに接合部材間の目違いを最小限に止めるよう、十分注意する必要がある。良い溶接ができるか否かは、溶接前のルート間隔や目違いの精度に支配されると言える。一方、ルート間隔のばらつきや目違いの発生は、鉄骨製作精度や現場施工精度上やむをえないが、これらのバラツキをできるだけ少なくするのが望まれる。必要に応じ

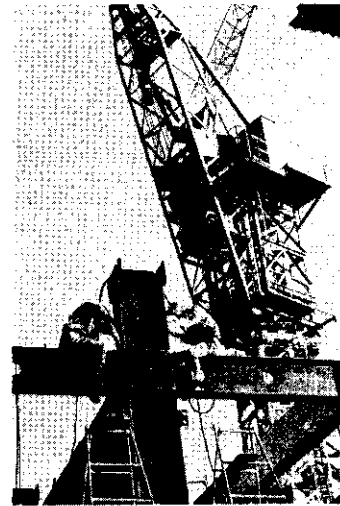


写真 10 R-H工法施工状況

て溶接事前検査シートを作成し、ルート間隔が標準開先条件に適合しなかった箇所は、溶接前にガウジングなどによって修正する。

(2) ウェブの高力ボルトは溶接前に本締めを行なう。

(3) 裏あて金は現場で取り付ける。これは裏あて金の表面や、裏あて金と母材とのすき間にさび、水分、どろなどが付着するのを防ぐためである。また、裏あて金および裏あて材は母材に密着するように十分注意する。これが不完全であると、ルート部のオーバーラップやスラグ巻込みなどの欠陥を生じる。裏あて金は母材に仮付け溶接し、裏あて材はマグネットや適当な浴具を使用してセットする。またSB方式の場合、接合部材間の目違いが2mm以上では図32左側のように裏あて金を2枚使用する。

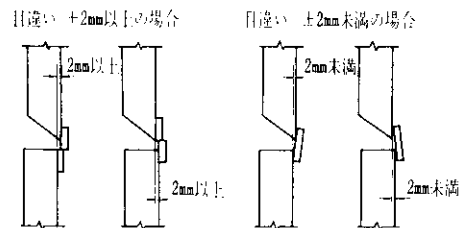


図 32 SB方式の裏あて金取付方法

(4) 溶接に先だち、溶接面に付着したさび、水

表 10 1層目の標準溶接条件

バックング方式	溶接方法	溶接棒またはワイヤー	バックング材	ルート間隔 (mm)	棒径 (mmφ)	電流 (A)
FB方式	手溶接	KS-76	銅板およびBF-1(テープ)	4~7	4	140~180
				7~10	4	140~170
					5	170~220
SB方式	手溶接	母材により適宜決定 ただしノーガス半自動 併用の場合はKS-76	鋼裏あて金	4~7	4	160~190
				7以上	5	190~250
	ノーガス半自動溶接	KOA-1	鋼裏あて金	4以上	3.2	380~450

分、どろ、塗料、その他溶接に支障となるものをあらかじめ除去する。また、裏波溶接の柱一はり継手の場合、柱側溶接部の黒皮を除去しておく。その理由は、黒皮が残存していると柱側ルート部にオーバーラップを生じ易いからである。

(5) R-H工法では、ルート部1層目の溶接が非常に重要であり、これが溶接継手の強度を支配すると言っても過言ではない。特に裏あて材を用いたFB方式における1層目の溶接では、良好な裏波を形成させるために、ルート間隔の大小に応じて溶接条件を変える必要がある。表10にR-H工法による第1層目の標準溶接条件を、図33にFB方式に用いる銅板の形状寸法を示す。

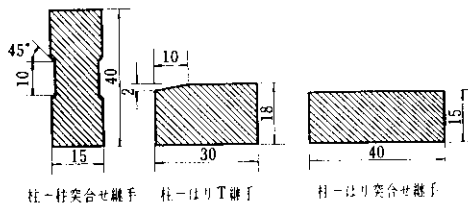


図 33 FB方式に使用する銅板の形状

(6) 以上のほか、母材の種類による溶接棒の選択、予熱後熱の要否、溶接順序、溶接足場などを十分検討するのはもちろんのこと、さらに、溶接

の基礎的知識と経験を持った現場管理者を工事ごとに配置して、適切な管理を行なわせることが必要である。

8. あとがき

以上で、R-H工法の概要を説明し、技術資料の一部を報告したが、筆者らはこれら以外にも、R-H工法に関して多くの実験的研究を行っており、R-H工法が鉄骨建築の現場溶接法としてきわめてすぐれた工法であることを確認している。したがって、鉄骨建築に現場溶接を採用する場合には、本報告書を十分に活用することによって、良好な結果がえられるものと思われる。さらに付け加えたいことは、どのような立派な溶接施工要領書を作成しても、その要領書通りに施工を行わなければ、決して期待通りの良い継手強度がえられるものではないという事実であり、できる限り現場溶接工の教育や溶接管理者による溶接工の管理、溶接後の検査方法などに留意して、確実な施工を行なうことが肝要である。

最後に、このR-H工法を開発するに当たり、早稲田大学鶴田明教授に貴重なご助言をいただきましたことをここに記して謝意を表す所である。

参考文献

- 1) 加藤正晴他：橋梁と基礎，5 (1970) 6, 21
- 2) 日本建築学会：溶接工作基準同解説，(1962)，23
- 3) 加藤勉，森田耕次：日本建築学会論文報告集，(1969) 156, 1
- 4) J. Dearden and H. O'Neil : Trans. Inst. Weld., (1940) Oct., 203

- 5) 村田安房他：溶接技術，18 (1970) 9, 75
- 6) 木原博：高張力鋼の溶接，(1968)，145, [産報]
- 7) 桜井怜：鉄骨構造の諸問題，(1970) 99
- 8) 徳田忠明：溶接技術，(1968) 12, 29
- 9) 例えば，岡田実，鈴木春義：溶接冶金，(1969)，13, [産報]

