

建築部材に対応したフラッシュ溶接装置の開発

梅 国 章・野 村 博 一・加 藤 勉

本開発は、フラッシュ溶接を用いた建築部材に対応した自動高速接合システムの構築を目的として行われた。従来、フラッシュ溶接は電気容量や装置重量が非常に大きいことから、大断面部材や現地接合への適用は困難とされてきた。これらの問題に対し、電気容量に関しては、電流とフラッシュ時間をパラメータとした基礎実験を実施することにより、電気容量の低減を図った。この結果、従来に比して1/50以下の電気容量で断面積200 cm²の各種断面の鋼材を接合できることを確認した。次に、装置重量に関しては、種々の応力解析を実施し、装置形状の最適化と機構の抜本的な見直しにより、大幅な軽量化を実現した。

キーワード：フラッシュ溶接、自動化、山留め、H形鋼

1. はじめに

鋼構造建築において、鉄骨部材の接合はアーク溶接または高力ボルトにより行われるのが一般的である。これらは工場での鉄骨製作や現場での鉄骨工事のクリティカルパスになることがあるため、工期の短縮や省人化を目指した工法の開発が行われてきた。特に、ガスシールド半自動アーク溶接では、建築現場で使用できる溶接ロボットの開発が盛んに行われ、大型の工事を中心に適用される場合もあった。現場における建築鉄骨用の溶接ロボットは溶接技能者の溶接作業の軽減によるアークタイムの向上という面では効果がある。しかしながら、溶接技能者が用いるのと同じ、ガスシールド半自動アーク溶接を用いているため、スラグ除去の必要性など溶接法の制約による自動化に対する障害があり、溶着速度に代表される施工効率の大幅な向上による工期短縮も期待できない。

したがって、この種の溶接ロボットの導入は、溶接技能者の高齢化対策や熟練技能者の不足対応には有効であるが、大幅な工期の短縮には大量に溶接ロボットとオペレータを投入する以外に効果はないのが現状である。

本開発では、溶接方法に捕われることなく、脱技能化と工期の大幅な短縮の実現を可能とする接合法の絞込みから検討を始め、絞込んだ接合法を用いた建築部材に対応したフラッシュ溶接装置の

構想立案、設計、製作及び施工実験が行われた。

2. 接合法

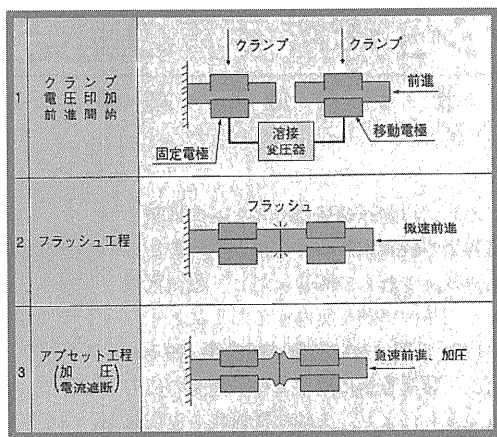
接合法の検討の結果、ガスシールド半自動アーク溶接では、鉄骨精度やスラグ除去の必要性などの問題から、溶接技能者の介在が不可避であり、最も自動化を達成しやすいのはスポット溶接をはじめとした抵抗溶接と拡散接合であった。しかし、スポット溶接では大断面である建築部材の接合は不可能であり、また、拡散接合においては接合面の精度要求が現状の開先精度に比して非常に厳しく、鉄骨接合への適用は現実的でない判断された。

そのため、表—1に示すH 300×300のH形鋼程度の部材を接合した場合の比較検討結果から、最も可能性のあるフラッシュ溶接に接合法を絞込み、その後の開発を行った。フラッシュ溶接は図—1に示すように、接合する部材をクランプ(把持)し、部材間に大電流を流すことにより発生する火花(フラッシュ)により接合端面を加熱溶

表—1 接合法の比較

溶 接 法	施工場所		溶接時間 (min)	品 質	耐 候 性	設 備 費	脱 技 術
	工場	現地					
フラッシュバット溶接	○	○	5	○	○	×	○
ガス圧接	○	○	20	○	○	△	△
アーク溶接	—	○	60	○	×	△	×
テルミット溶接	—	○	40	△	○	○	△
拡散接合	○	○	10	△	×	×	△

H 300×300程度の部材の接合を想定



図一 フラッシュ溶接の原理

融させた後に、クランプにより把持された部材同士を 50 MPa 程度の加圧力で押しつけること（アプセット）により、酸化物や不純物を接合部材断面より外側に押し出して、ばりを成形し溶接する方法である。この溶接法は、

- ① 開先加工が不要
- ② コンピュータ制御により脱技能が図られる
- ③ 接合工程の再現性が高く、記録性も高い
- ④ クランプやアプセットに大きな力が必要であるため装置寸法、重量及び費用が大きくなる
- ⑤ フラッシュ発生のために大電気容量給電設備が必要

等の特徴を有する。以下にそれぞれの特徴の主たる原因を述べる。

フラッシュ工程において、部材端面の酸化物火花となり飛散し、酸化面を除去する必要がない。さらに、部材端面の凹凸はフラッシュ現象が部材端面の最も接近した箇所から発生し、その部分が溶融した後、次に接近している位置で火花が発生する。これを繰り返すことにより、部材端面間が平滑かつ平行となることにより、開先加工が不要となる。

前述のように、非常に簡単な機構により溶接が行われるため、自動化が容易で、オペレータの介入する余地がないことから脱技能が可能である。

次に、工程がコンピュータ制御されているため、安定した品質が得られ、すべての指令とその結果が記録されるため、記録性が高い。最後のアプセット工程で 50 MPa 程度の加圧をするためには、摩擦係数を考慮しその数倍のクランプ力が必要

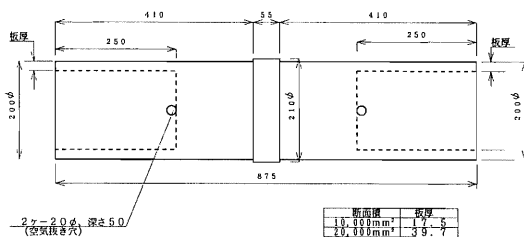
となり、装置が大型化、重量化することになる。

建築構造物の接合に適用される高力ボルト接合やアーク溶接に代わり、短時間で接合が終了し、技能を要しない特徴を有するフラッシュ溶接法が抱える電気容量や重量など、建築分野への適用上の問題点を解消し、自動車組立て等のようなマスプロダクションを前提に成立する自動接合システムと同等以上の効率を有する多品種少量生産の建築部材に対応したフラッシュ溶接装置を目指して開発が行われた。

3. 基礎実験

基礎実験では、既存の工場設置型の大型（重量 50 t）のフラッシュ溶接装置を用い、円形鋼管の接合への適用性を検討した。実験パラメータは電流とフラッシュ時間とし、低電流化とフラッシュ時間を長時間化した場合における、良好な接合部品質を確保可能な溶接条件の範囲を明らかにし、必要電気容量を確認することとした。また、H 形鋼材やボックス断面鋼材への適用性も検討した。

円形鋼管部材における必要電気容量の確認のために、図—2 に示す試験体を用いた。使用鋼材を SS 400 とし、直径 200 mm、板厚 (t) は 17.5 mm



図—2 円形鋼管試験体形状

表—2 試験結果一覧

試験体 サイズ	条 件				試 験 項 目			
	断面積 (cm ²)	フラッシュ 電 力 (kVA)	フラッシュ 時 間 (sec)	アプセット (mm)	引張り (MPa)	破断 位置	曲 げ	X 線
φ200 ×17.5	100	30	300	16.2	461	母材	○	○
	100	38	300	16.8	461	溶接	×	○
	100	55	300	17.5	470	母材	○	○
	100	75	200	17.0	465	母材	○	○
	100	93	200	17.7	462	母材	○	○
φ 200 ×39.7	200	55	300	7.5	452	溶接	×	×
	200	68	300	14.5	459	溶接	×	×
	200	88	300	15.2	445	溶接	○	○
	200	105	300	16.0	467	母材	○	○
	200	148	200	14.7	464	母材	○	○

と 39.7 mm とし、断面積 (A) はそれぞれ 100 cm² と 200 cm² とした。また、フラッシュ時間は 200~300 sec とした。

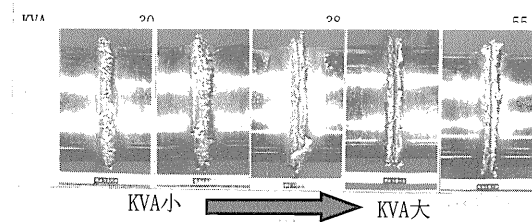
表一2 に設定した溶接条件と試験結果の一覧を示す。試験結果から、断面積 100 cm² では約 50 kVA、200 cm² では約 90 kVA の電気容量が良好な接合部が得られる最小の電気容量であった。また、300 秒以上のフラッシュ時間では、接合面のフラッシュによる加熱は飽和しており、フラッシュ量の増加となるだけの結果となった。

図一3 には断面積 100 cm² 試験体の各溶接条件での接合部外観を示す。

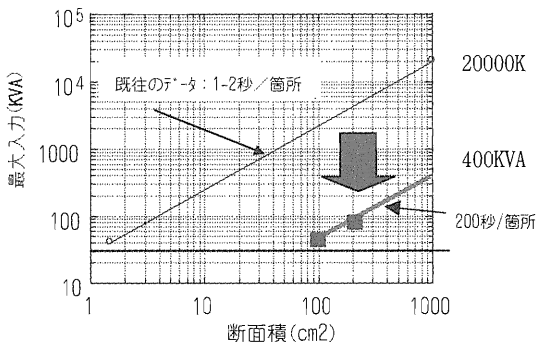
図一4 には電気容量と接合可能断面積の関係を既往のデータとの比較として示す。既往のデータは主として 1~10 秒程度に 1 箇所での接合を行うための工場設置型装置のデータであり、この溶接条件を建築構造物に使われる比較的大断面の断面積 1,000 cm² の部材に適用するとして外挿すると、約 20,000 kVA といった非常に大きな電気容量が必要になる。これに対し、本研究で得られたデータでは既往のデータに対し、1/50 程度の電気容量で接合が可能となり、1,000 cm² の断面積の部材でも約 400 kVA の電気容量で接合可能であると推測される。この結果、電気容量は現実的な数値となり、アプセット力に関する問題を解決するこ

とにより、フラッシュ溶接の建築部材への適用が可能であることが判明した。

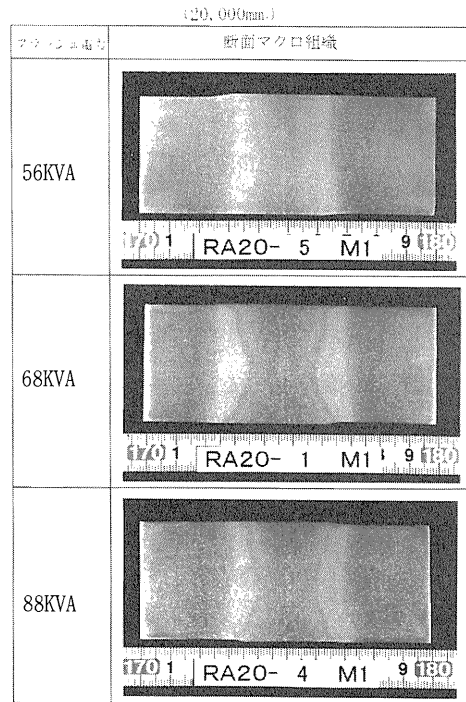
図一5 と図一6 には断面積 200 cm² のマクロ試験結果と硬さ試験結果を示す。軟化，硬化等は特に認められなかった。建築分野で一般的に用いられる H 形断面や箱形断面の部材に対しても、フ



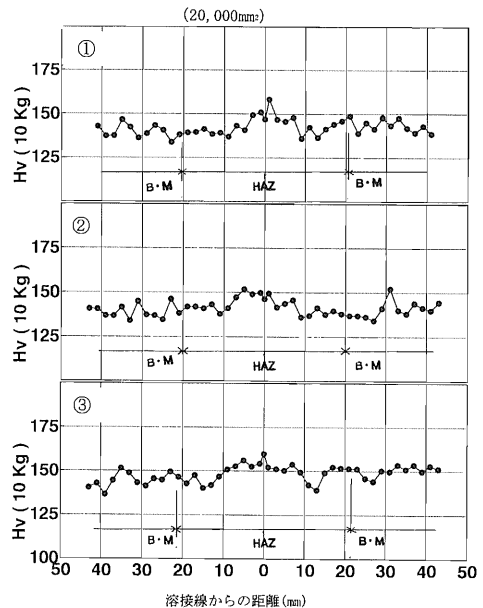
図一3 接合部外観 (100 cm²)



図一4 電気容量と接合可能断面積の関係



図一5 断面マクロ



図一6 硬さ試験結果

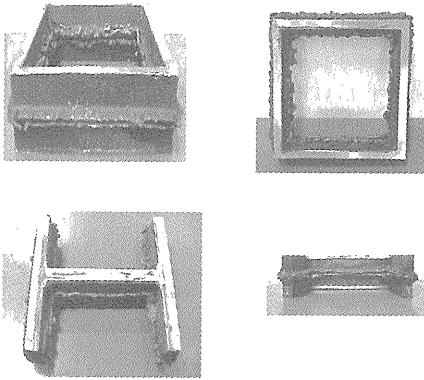


図-7 各種断面形状に対する適用状況

ラッシュ溶接の適用性を検討した。その結果、図-7に示すように、円形鋼管同様に、良好な溶接性が確認された。

4. プロトタイプ装置

従来、フラッシュ溶接装置は大重量かつ大型であるのが一般的であり、断面積が 200 cm^2 を超えるような部材の接合には 50 t 以上の重量の装置となっていた。このため、フラッシュ溶接を現地接合に使用することは不可能であった。したがって、種々の応力解析を行うことにより、クランプフレームの形状とクランプ位置の最適化を実施することにより軽量化を図った。

図-8は図-11に示すようなプロトタイプ1次案に対するH形鋼用のクランプフレームの解析例である。クランプ位置はウェブとし、 $H700 \times 300$ までクランプ可能なフレーム寸法とした。図-8に示すように矩形フレームと円形フレームの応力状態の相違を検討したが、円形フレームは矩形フレームの $1/2$ 程度の応力度となり、軽量化に有効であることが確認された。

クランプ位置はアプセット力に影響するため、最適なクランプ位置を検討した例を図-9に示す。接合面から $1/2 D$ (350 mm) の位置をクランプした場合にはフランジ端において十分なアプセット力が得られない可能性が明らかとなり、 $H700 \times 300$ のウェブをクランプする場合はクランプ位置を接合面より $1 D$ (700 mm) 以上離すことにより、十分なアプセット力が全断面で得られることが確認された。

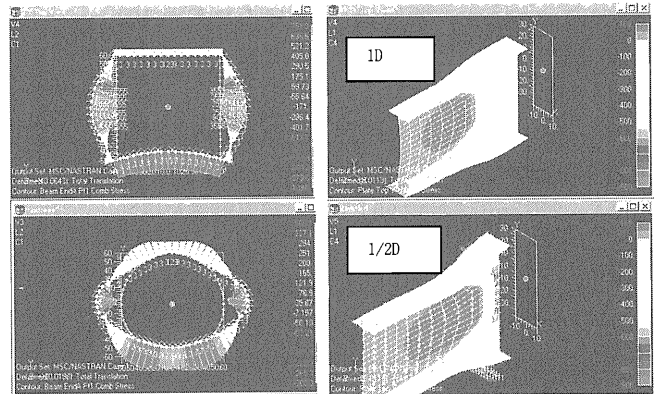


図-8 クランプフレーム応力解析例

図-9 アプセット応力解析例

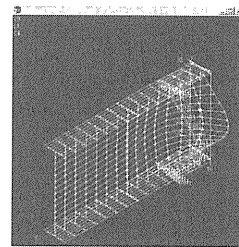


図-10 アプセット座屈解析例

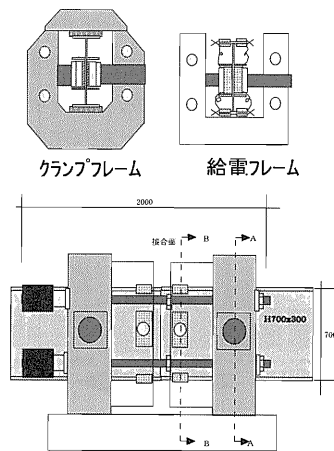


図-11 プロトタイプ装置一次案

また、図-10に示すように、接合面より $1 D$ の位置においてウェブをクランプした場合のH形鋼の座屈耐力は、アプセット力の6倍程度あり問題とならないことが明らかとなった。これらの結果から1次設計を実施した。

図-11に示す装置は $H700 \times 300$ から $H300 \times 300$ までに適用が可能で、重量はほぼ 8 t とかなりの軽量化を達成した。また、電流解析も実施し、

給電する位置からもっとも遠いフランジ端部にも十分電流が供給されるように工夫を行った。しかし、建築構造物の現地での接合に適用するにはさらに大幅な軽量化が必要である。このため、クランプ方式とアプセット方式を抜本的に見直し、総重量2tを目標としたプロトタイプ装置の検討を実施した。

従来のウェブをクランプする方式から、図-12に示すように、断面積の大きなフランジをクランプする方式に変更し、クランプ位置からクランプフレームまでの距離を短縮し、アプセット時に発生するモーメントを低減した。その際、フランジに発生する局部曲げや接合面へのアプセット力の伝達を応力解析で確認した。解析結果を図-13に示す。

さらに、従来、不可欠であったクランプフレーム自身を省略し、上下フランジ近傍に配置したアクチュエータを変位制御し、同調制御することによりフラッシュ工程とアプセットを行うこととした。また、給電フレームに装着された給電クランプによる給電を簡易なクランプによりフランジにフレームなしに給電する機構に変更した。その結果、装置重量は目標の2tを下回り、非常に軽量でコンパクトな構造となった。製作されたプロトタイプ装置を図-14に示す。

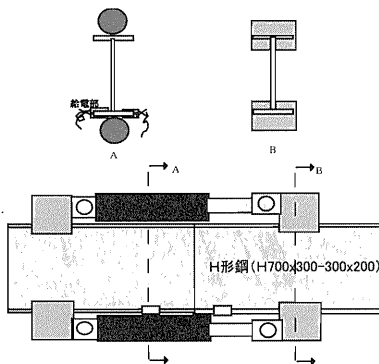


図-12 プロトタイプ装置最終案

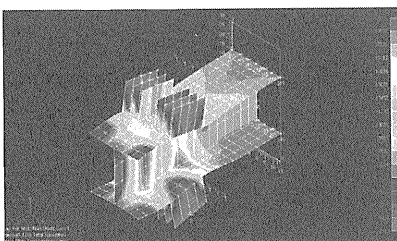


図-13 アプセット応力解析例

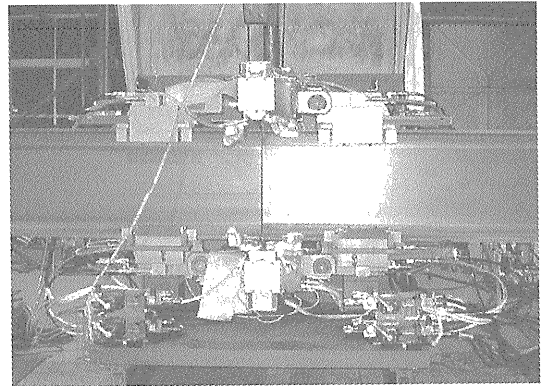


図-14 プロトタイプ装置

5. 溶接性実験及びその接合部の評価

プロトタイプとして製作された可搬式のH形鋼用のフラッシュ溶接装置を用いて、建築用鋼材として最も一般的な鋼種であるSS400のH形鋼300×300×10×15を対象とした実験を実施した。図-15に実験状況を示す。



図-15 フラッシュ溶接実験状況

(1) 機械試験

溶接条件は基礎実験で得られた条件を基本とした。図-16に設定電力(フラッシュ電力)65kVAの溶接条件で製作したバリ付き試験体の引張り試

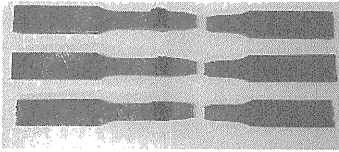


図-16 引張り試験（バリ付き）

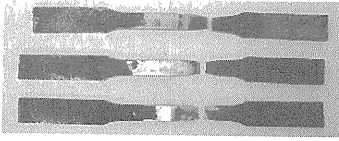


図-17 引張り試験（バリ切除）

験結果を示す。図-17 にバリを切削した試験体の引張り試験結果を示す。溶接条件設定により、母材破断となる接合部が実現できる可能性が見いだされた。

(2) 実大曲げ試験

図-18 に $H 300 \times 300$ の実大曲げ試験体の形状を示す。加力方法は4点曲げとし、加力ジグにより接合部近傍に等モーメントが作用するように設定した。溶接条件は設定電力（フラッシュ電力）77 kVA とし、2次電圧を7.3 V、フラッシュ時間を277秒、アプセット量を15 mmとした。

接合部近傍のフランジ部分に貼付した歪みゲージ位置とその番号を示す。図-19 に実験状況を示す。加力は一方向の繰返し载荷とした。サードリップ部など形状不連続部の応力集中などの影響を確認するために、接合部はバリ付きのままとした。

図-20 に試験体中央部での変形状態を示す。図に示すように、 M_y （降伏モーメント；Yield Moment）を超え、最大荷重に達し大きな変形を生じた後、接合部が局部座屈した状況である。

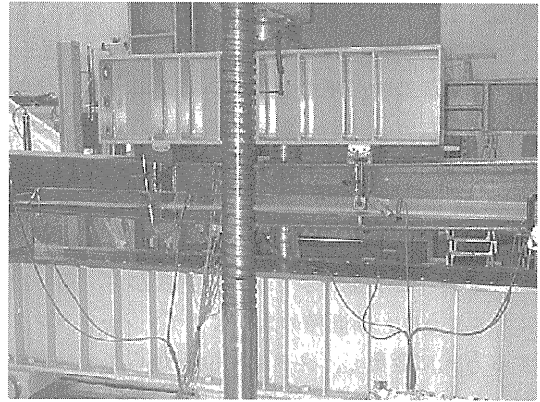


図-19 曲げ試験状況

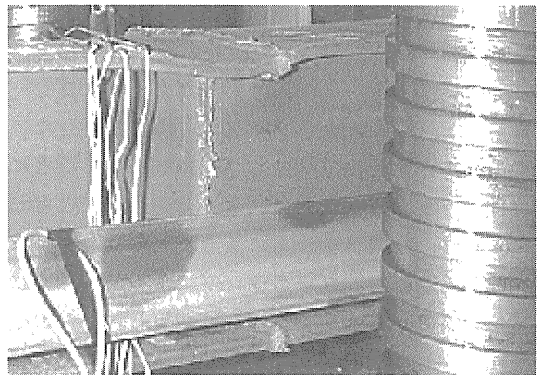


図-20 座屈発生状況

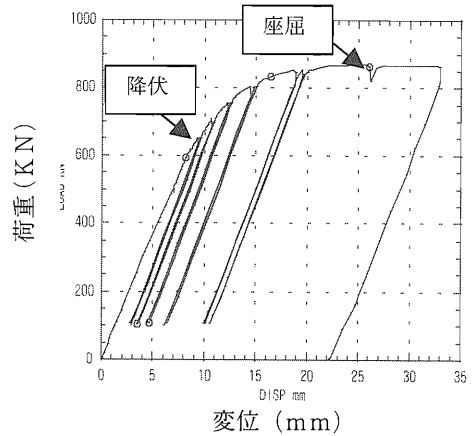


図-21 荷重 - 加力点変形関係

図-21 に荷重と加力点にける変形関係を示す。降伏荷重 640 kN 近傍で大きく変形が進み始め、同一の荷重で数回の繰返しを行ったが、変化は見いだせなかった。荷重が 866 kN に達した後は徐々に荷重が低下しはじめ、接合部近傍において局部座屈が進行した。

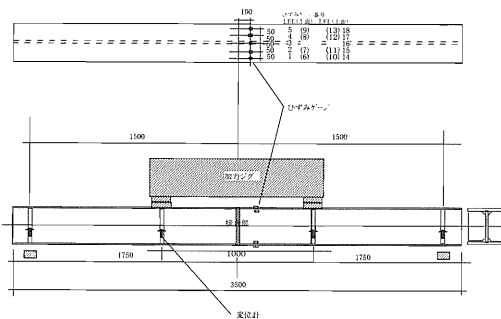
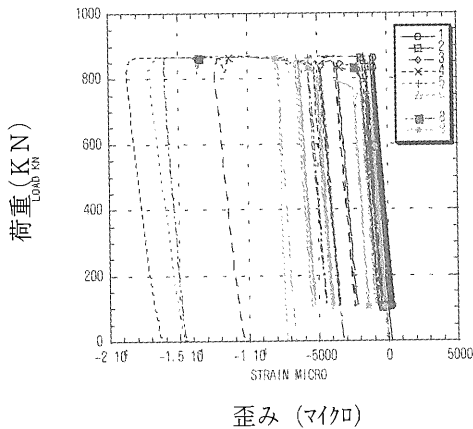


図-18 曲げ試験セットアップ

図-22 に上フランジの歪みを示す。上フランジは大きな塑性変形を生じていることがわかる。

図-23 には載荷終了後の接合部の状況を示す。圧縮側、引張り側とも亀裂などの発生は認められなかった。

以上の検討を経て、実工事に適用した。山留めH形鋼（588×300）への適用状況を図-24 に示す。



歪み (マイクロ)
図-22 荷重 - 上フランジの歪み関係

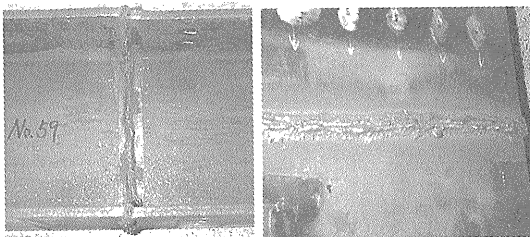


図-23 載荷試験後状況

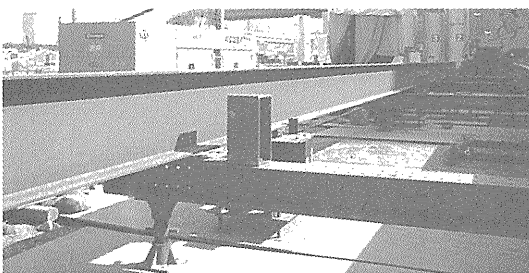


図-24 実工事適用状況

6. ま と め

低電気容量化、軽量化及び小型化を実現し、建築部材に対応した現場溶接用の自動フラッシュ溶接装置の開発を行った。その結果、従来のアーク溶接に比して大幅に接合時間の短縮が図られるとともに、良好な性能を有する接合部が得られることが確認された。今後、実工事に適用しながら装置の改善を図る予定である。

なお、本開発は新エネルギー・産業技術総合開発機構の提案公募事業により行われた。

《参考文献》

- 1) 中村 孝ほか, 抵抗溶接, 産報出版 (1979)

〔筆者紹介〕



梅国 章 (うめくに あきら)
株式会社竹中工務店
技術研究所



野村 博一 (のむら ひろかず)
日本鋼管工事株式会社



加藤 勉 (かとう べん)
財団法人溶接研究所