

上向き溶接を適用した鉄骨柱梁継手の耐震性向上について

Overhead Welding for a Column and Beam Flange Joint

湯田 誠
Makoto YUDA

川田工業(株)橋梁事業部生産企画部
溶接研究室係長

栗山 晋
Susumu KURIYAMA

川田工業(株)鉄構事業部
栃木工場システム開発課係長

岩田 祥史
Yoshifumi IWATA

川田工業(株)橋梁事業部生産企画部
溶接研究室

阪神淡路大震災等を契機として鉄骨柱×梁接合部の耐震性能向上が強く求められるようになり、様々な工法が提案され現在までに多くの鉄骨製作に生かされつつある。これらの工法は運用図書等に明記されることで標準化され製作コストが落ち着いたものもあるが、長引く不況と鉄骨価格の低迷のためさらなるコスト低減が要求されている。ここに紹介する工法は、柱×梁継手部に上向き溶接を導入することで更なるコストの低減と耐震性向上を図ったものである。

キーワード：上向き溶接，現場溶接施工，ロボット

1. はじめに

鉄骨柱×梁継手部の現場溶接施工は、従来上下フランジとも下向き溶接施工で行われており、下フランジについてはウェブとフランジの交差部に溶接施工性を考慮した大きさのスカラップを設けていた。

しかし震災後、スカラップや梁下外面に残存する裏当て金スリット部が破壊の起点になるという危険性が指摘されたため、柱×梁継手部はこれまでのノンブラケット方式から柱にブラケット（仕口部）を工場溶接し、建て方現場にて仕口部のフランジと梁フランジの溶接を行うようになった。仕口部は、下フランジ共に外側開先となりいずれもノンスカラップ、改良型スカラップが採用されている。したがって、梁端部では耐震性に富んだ継手が工場製作にて作り込まれることになる。

しかしながら、仕口部を工場製作にて組み立てする方法は、次に示すいくつかのデメリットも考えられる。

- ・ 食い違いの問題とその対応
- ・ 工場製作に関するコスト増
- ・ 梁に対する溶接量増
- ・ 品質検査（UT）の作業性

これらのデメリットは今日、鉄骨価格が低迷しコスト減を迫られている現状では深刻な問題となっている。

もし、現場溶接に適用可能な上向き溶接工法が実現さ

れば、これらの課題は一挙に解消されコストダウンの要求にも対応できる。

表1に、現状施工法の問題点と今回提案する上向き溶接工法を導入した場合の評価を示す。

一方、上向き溶接施工は特に溶接作業者の技量に頼ることが多く、また現場溶接継手は開先誤差が大きいため溶接速度、積層パターンなどの条件調整をその都度調整する必要があり、施工を煩雑なものとしている。こうした問題を解決するため、本施工法では開先形状を認識することにより自動的に溶接条件、積層パターンを作成・施工する溶接ロボットの導入を行った。

2. 技術的課題

(1) 上向き溶接に関して

上向き溶接の技術的課題としては、以下の点が挙げられる。

下向き溶接と比較して生産性が低い。

上向き溶接では溶接金属の溶け落ち、ビードの凸形状を防止するために1パスあたりの溶着量を少なくせざるを得ないため、積層数が増える傾向にある。一方、アークを安定させるためフラックス入りワイヤとAr+CO₂混合ガスの組合せが一般的に用いられるが、フラックス入りワイヤはその特性上ソリッドワイヤに比べてスラグ剥離作業を頻繁に

行う必要がある。

一方混合ガスはCO₂ガスに比べ耐風性に敏感で防風対策をより強固にする必要がある。以上のことから他の姿勢の溶接法と比較して時間や手間がかかり生産性が低い。

溶接に対する技量や柔軟性が要求される。

上向き溶接施工は最適条件範囲が狭いため、溶接にあたっては開先形状の狂い、電流の変動等に対してねらい位置、溶接速度等の調整など速やかな対応が要求される。したがって溶接作業者の高度な技量や柔軟性が必要となる。

(2) 鉄骨現場溶接に関して

建築鉄骨の現場溶接では、開先角度やルートギャップの精度を確保することは非常に難しい。したがって溶接中の狙い位置や開先断面積に応じた溶接条件の調整が必要となり、従来の簡易自動溶接機では溶接中の常時監視を余儀なくされていた。

(3) 開発目標

以上のように建築鉄骨の現場溶接に上向き溶接法を導入するためには、溶接そのものの難しさに加え、現場特有の課題を克服しなければならない。そこで、開発にあたっては以下の項目を目標とした。

安価で耐風性能の良いCO₂ガスシールドのもとで安定したアーク状態が維持でき、耐溶落ち性および溶接性に優れた溶接材料の適用。

現場の開先精度に十分対応できる溶接施工条件。

開先ならいまたはティーチングにより常時監視を必要としない（オペレーターがロボットを複数管理できる）簡易ロボットの使用。

3. 検討内容と結果

(1) 溶接材料

上向き溶接は最適条件の範囲が狭いため、従来はオペレータの技量や監視に頼っていたが、自動溶接を実現するためには、若干の最適条件からのずれが生じてもアーク状態を安定に保つ溶接材料が必要となる。また、ノズルのメンテナンス上スパッタ発生量の少ないことが望ましい。

本施工法に採用したDW-1STは、フラックスに新たなスラグ系を適用しており、熔融金属の高粘性化により上向き溶接施工での溶滴の落下が起こりにくい。また正極性（電極がマイナス）であるため溶滴移行形体が安定したスプレー状移行で、スパッタの発生が少ないなど上向き自動溶接に適している。

更に、CO₂ガスシールド中でも上記のような安定した施工が可能のため、Ar + CO₂混合ガスを用いた従来法と比較してシールド性が向上するのみならず、ガスコストも低減することができる。

(2) 溶接ロボット

現場にて自動溶接機の複数台管理を実現するためには、以下の機能を搭載した簡易ロボットが必要である。

多点センシングにより、溶接線の誤差を事前に検知させ、マニュアルによる溶接中のねらい位置補正が不要となる機能。

開先形状、断面積を認識し、最適な溶接条件を自動作成する機能。

様々な溶接施工への要求事項に対し、条件ソフトのパラメータを変更することにより柔軟に対応できる機能。

表1 現状施工法の課題と提案工法の評価、メリット

課題	具体的内容	上向き工法のメリット
食い違いの問題	建築基準法改定（告示1464号）にともない明確な許容範囲が示されたが、フランジの傘折れ、傾きなど単品精度が品質確保に大きく左右し、製作誤差に応じた最適な補修方法について難しさが生じている。	直接、柱に梁が取り付く既存の工法ならば、フランジ相互の単品精度の影響を考慮する必要がなく梁フランジのみの単独精度管理となる。
工場製作コスト	仕口部にかかわる、製作コスト、管理コスト、検査コストならびに建て方現場での仮設コストなど全てがかかり納期短縮やコストダウンに限界がある。	既存の工法として認識があるように、柱、梁と単品の製作工程ですみ仕口部を省略できることにより、以下のメリットがある。 <ul style="list-style-type: none">・製作工期の短縮・輸送効率の改善・仮設計画の簡素化
梁における多大な溶接	柱と仕口部、仕口部と梁といった溶接継手が多く存在し、溶接による初期変形や残留応力の問題を残すことになる。	現行法の半分の溶接量となり人為的に作られる溶接欠陥等の弊害を少なくできる。
下フランジ溶接部の超音波探傷検査	フランジ溶接部にてウェブとの交差する部位は通常の斜角探傷が精密に入らない。	検査姿勢は上向きとなるが、上フランジと同様にフランジ上面からの探傷が可能となる。



写真1 ロボット用レール

溶接ロボットの選定にあたっては、汎用性を考慮し市販のロボットから上記機能を有するものを吟味した。

走行用レールについては、本施工法では下フランジにロボットを取り付けるため、取り付け治具を有するレールを試作した（写真1）。治具はフランジ形状に柔軟に対応でき、設置の簡易性を考慮している。

（3）溶接条件

（2）でも述べたようにDW-1STは従来の溶材と組成やワイヤ極性が異なるため、従来の上向き溶接の条件がそのまま適用できない。したがって新たに上向き溶接条件の調整を行った。

実験の結果、200A-20Vの溶接条件とトーチ角度を若干後退角とすることによって最もアーク状態が安定し、DW-1STの特性が最大限に発揮されることがわかった。そこで、基本条件を200A-20Vとし、状況に合わせて若干のバリエーションを持たせた。

（4）施工能率と品質

多層盛り溶接では、施工能率を向上するためにはパス数の低減が重要である。しかしながら、上向き溶接では過度のパス数低減は積層状態に無理を生じさせ、ビード形成の安定性、耐溶け落ち性、耐欠陥性が低下する。

したがって本施工法では、施工能率と溶接部の品質が両立する溶接条件を自動生成できるように溶接条件生成ソフトのパラメータを調整した。

実験では、実際の柱×梁接合部に相当する試験体に対して自動生成した溶接条件を用いて溶接を行い、ビード形状、溶接欠陥の有無を評価し、条件生成ソフトのパラメータ設定にフィードバックした。

試験体形状を図1に示す。梁フランジ板厚は19, 25, 32, 40 mmの4パターンとし、フランジ幅（溶接長）は250 mmとした。なお、材質はSN490Bである。

一方開先形状はJASS6開先標準に基づき、開先角度35°、ルートギャップ7 mmとした。

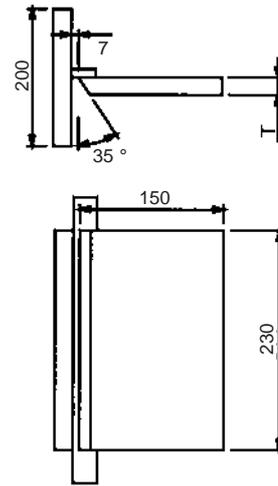


図1 試験体形状

積層

以上により基本的なパラメータ設定が完成した。これにより作成された溶接条件による各板厚の溶接総パス数、総入熱量、アークタイムの一例を表2に示す。前述のように溶接条件、積層パターンは自動作成されるので、標準開先（ルートギャップ7 mm、開先角度35°）の場合は、ほぼ表2に示す内容となる。

実験の結果諸作業を含めた施工時間については、板厚19~32 mmについては1~3時間程度で、ロボットの複数台管理が可能であることを考慮すると施工能率上も特に問題ないことがわかった。施工中の様子を写真2に示す。

表2 各板厚の施工状況

板厚 (mm)	総パス数	パス当たり入熱量 (kJ)	アークタイム (min)
19	14~16	9~24	25~35
25	21~23	9~24	35~45
32	30~32	9~21	50~60
40	34~36	9~23	60~70

板厚40 mmについてはルートギャップ7 mm、開先角度30°での参考値、現在検討中。



写真2 溶接施工中

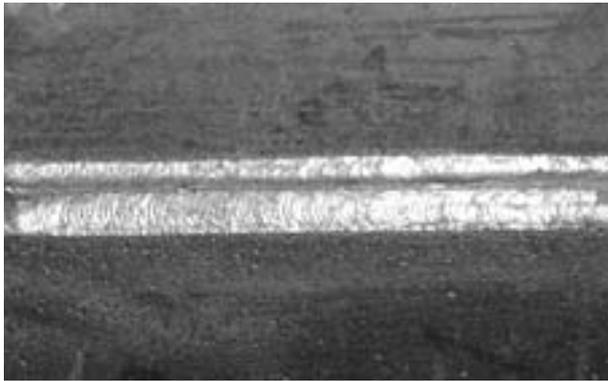


写真3 ビード外観 (19 mm)

ビード外観

板厚19～32 mmについては、ビード外観はJASS6基準以内であり良好だった。写真3にビード外観(板厚19 mm)を示す。

ビード形成の安定性と施工能率の両立が難しいため、現在板厚40 mmについては、施工能率とビード外観向上のため開先仕様を含めた再検討を行っている。

内部欠陥

2層目以降については、下向き溶接と同等の品質が得られた。

しかしながら、ルート部については超音波探傷検査(UT)の結果、立板と裏当て金との当たり面からのいわゆる疑似エコーが検出された。

ルート部は欠陥の発生しやすい箇所であるが、本施工法のケースではほとんどが上向き溶接特有の浅い溶込みによるものと見られ、マクロ試験では顕著な欠陥は見られなかった。

そこで、ルート部の品質を下向き溶接並みにするため、形状を改良した裏当て金を使用した。その結果、ルート部に安定した溶け込み(平均2 mm)が得られ、UT検査の問題も解消した。

継手部の機械的性能

本施工を行った溶接部のうち、板厚19 mmと40 mmについて継手引張試験およびシャルピー衝撃試験を実施した。

継手引張試験片は、本溶接部の反対側に同じ板厚のダイヤフラムを溶接し、十字形継手とした。また衝撃試験片は、板厚19 mmは板中央部1ヶ所からの採取、板厚40 mmは上下表面から各2 mm入った2ヶ所から採取した。

板厚40 mmについては 述べた通り施工能率とビード形状を満足する条件が確立されておらず今回は本施工法の適用は見送ったが、将来的に実施を視野に入れているため、参考としてレ型30°、ルートギャップ7 mmの開先形状にて機械的性能の確認を行った。

表3 機械試験結果

板厚 (mm)	19	40
採取位置		
継手引張強度 (N/mm ²)	580.4 (破断位置・母材)	568.7 (破断位置・母材)
衝撃値 (J)	100.3	上部117.3 下部121.7
断面マクロ		

結果を表3に示す。継手引張試験、衝撃試験とも母材規格値を満たしている。

4. 実施工に向けた検討

実際の建て方現場では、図1に示すような規程どおりのルートギャップを確保することは難しい。また開先がテーパー状に広がり溶接線前後でルートギャップが異なる場合もある。

更に、実際の柱と試験体では熱容量、拘束度、通電状態が異なるため溶込み量、アーク状態、積層に差が生じると考えられる。

そこで、自動作成された溶接条件の規格外のルートギャップに対する適応性、ビード外観への影響、欠陥の有無を調査し、適用ルートギャップ範囲を見極める実験を行った。

更に次の段階として、実大BOX柱を用いた溶接実験を行い、試験体実験で最適化を行った条件生成ソフトの最終調整を行った。

(1) 平行ルートギャップの誤差範囲

5, 10, 15 mmの3通りの平行ルートギャップについてビード外観、品質を調査し適用ルートギャップ範囲の見極めを行った。

ルートギャップが5～10 mmの場合はビード外観，品質とも特に問題は見られないが，10 mmを超えると欠陥等の発生は見られないもののビード外観形状の維持が若干難しくなる。また15 mmを超えると溶接時間が長くなり能率が低下する。

一方ルートギャップが5 mm以下の場合は，ルートギャップが狭くなるにつれ壁側へのサイドアークやワイヤの曲がり癖の影響を受けやすくなり，品質維持が難しくなることが確認された。

(2) テーパーギャップの適用範囲

本施工法にて使用する簡易ロボットは，溶接線に発生するルートギャップ変化に対して同じ積層方法で溶接を実施する。したがって，テーパーギャップが発生した場合にはビード形状，耐欠陥性等が著しく低下する恐れがあるため，テーパーギャップ発生時の品質確認試験を行った。テーパーギャップについては，5～10 mm，10～15 mm，5～15 mmという3通りのルートギャップの組み合わせでビード外観，品質を調査し適用範囲の見極めを行った。なお，溶接長は250 mmである。

のテーパーギャップでは，外観，品質的に全く問題はなかった（写真4）。また，のテーパーギャップではビード外観が若干よりも劣るものの問題はなかった。

しかしながらのテーパーギャップでは，ルートギャップ差の拡大によって両端側に近づくほど自動生成された溶接条件のパス数と最適パス数との差が大きく，積層状態に無理が生じる。これによりウィーピング条件に無理が生じて溶融池が不安定となり，欠陥や溶け落ちが生じ，初層，第2層を中心に内部欠陥が発生した。

(3) 実大BOX柱試験

実大BOX試験体は，長さ2 000 mm，断面500×500 mm，板厚40 mmのBOX柱に試験体と同じ仕口を取り付けた。フランジ幅は250 mmと400 mmで，フランジ板厚は基礎実験で良好な結果が得られた19～32 mmについて実験を行った。

結果は，アーク状態，溶接品質，外観について，両フランジ幅とも特に問題はなかった。

なお，拘束度の関係からBOX柱試験体は溶接変形量が少なく，基礎実験で設定した余盛り高さとの間にずれが生じたため，若干の微調整を行った。

写真5にビード外観を示す。

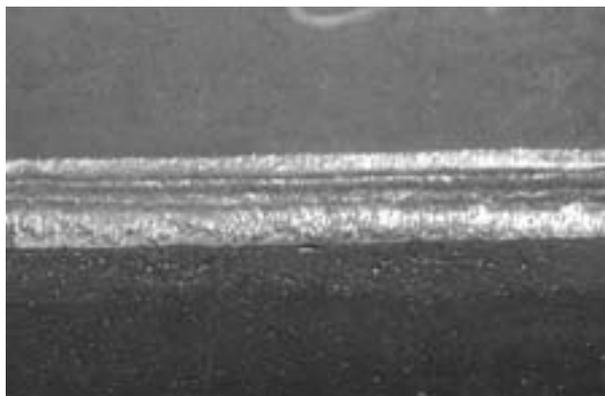


写真4 ビード外観 (テーパーギャップ: 19 mm)

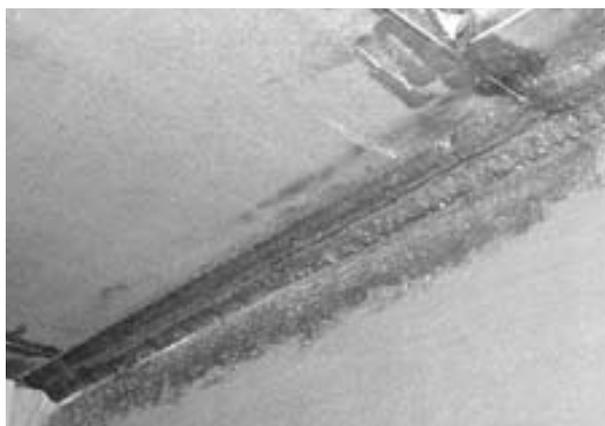


写真5 ビード外観 (BOX試験体: 19 mm)

5. 適用範囲

これまでの実験の結果，DW-1STを用いた自動溶接機による上向き施工は十分可能であることがわかった。しかしながら必ずしもいかなる板厚，状態の現場柱×梁継手部に適用可能というわけではない。したがって表4に現段階での適用範囲を示す。

表4 本施工法の適用範囲

項目	範囲	コメント
板厚 (mm)	19	適用可能
	25	適用可能
	32	適用可能
	40	検討中
ルートギャップ (mm)	5 mm以下	欠陥発生
	5～10 mm	適用範囲
	10 mm以上	欠陥発生の危険は少ない ビード外観保持が難しい
テーパーギャップ (mm)	5⇔10	適用範囲
	10⇔15	外観不良
	5⇔15	欠陥発生、外観不良
エンドタブ長さ (mm)	80 mm以上	板厚19～32 mm

テーパーギャップ試験の溶接長は250 mm

参考文献

6. おわりに

ノンブラケット工法および耐震性を考慮した溶接工法を実現するため、鉄骨柱×梁現場溶接継手の下フランジ溶接部に対する上向き溶接工法の検討を行った。その結果、現段階では板厚や開先精度に若干の制約があるものの、実際の建築鉄骨現場でも溶接品質と有効性が十分見込める上向き溶接施工法が確立できたと考えている。

今後本施工法をより実用的なものとするためには実際の現場に適用し、抽出される問題をフィードバックしながら引き続き検討を深めていく必要がある。

本施工は(株)神戸製鋼所殿との共同開発であり、特に溶接材料の面で多大なご協力をいただいた溶接カンパニーの横田順弘氏、丸山徳治氏に紙面を借りてお礼を申し上げます。

- 1) (社)鋼材倶楽部：ノースリッジ地震後、鉄骨ラーメン構造について米国の行政・学・協会などの採った対策調査報告書，1995.
- 2) 日本建築学会：兵庫県南部地震における鋼構造物の被害と教訓，1996.
- 3) 例えば，通しダイヤフラム形式で角形鋼管柱に接合されるH形鋼梁の塑性変形能力に関する実大実験 報告書，1997.
- 4) 日本建築学会：鉄骨工事技術指針 工場製作編，1996.
- 5) 神戸製鋼所：溶接カンパニー技術報告 DW-1STを用いた上向き溶接施工法，1999.