

鉄構生産における溶接技術の現状と 今後の問題点

川崎重工業株式会社
鉄構事業部

須 清 修 造

1. 鋼構造物の趨勢

私共が鋼溶接構造物として製造しているものは種類が多い。建築鉄骨、橋梁、鉄管、門扉、鉄塔、煙突、貯槽等の生産が一般的であり、機械架構、製鉄機械、圧力容器、土木構造、車輛船舶等も特例として手掛ける。

これらの構造物の新しい傾向は、いわゆる新製品の登場と、大型化であろう。

新製品に類するものは、低温貯槽、海洋構造物、特殊運搬機械の架構、原子力関連設備等の新しい需要に対応するものである。

構造物の大型化は種々の形で現れている。超高層ビル鉄骨、長大スパン屋根鉄骨、長大橋、揚水ダム式水圧鉄管、河口ダム用大型水門扉、超高電波塔、超高煙突、大型貯油槽、大径長距離配管、大型土木構造および土木機械製品、海洋構造物、大型揚重機等があげられる。

鋼構造物の大型化に付随して、厚板の使用、高張力鋼の使用や構造のハイブリッド化による軽量化、大型部材、大型ブロックを使用した製造法の発展等、種々技術的な変化が起こっている。

また製品の大型化に伴い重量物の取扱いのための荷役運搬設備や、厚板の切断、曲げ、組立溶接等の加工設備の大型化が進行しており、新しい工場程大スパンの建屋の中に大容量の起重機設備を有している。

さて、生産形態の変化は、このような大型化の他に、量的な拡大によっても起こっている。しかし、鉄構生産の形態は始めに述べたような多種類製品の注文生産方式という基調は仲々変化せず、例外品を除いては個別生産方式であり量産方式に通常採用されているような合理化の

手法を導入することは困難なことである。

現在、国全体が従前の生産第一主義を見直して、福祉向上、公害防止に関心が集まっている状況では、今後この種の生産が量的な拡大によって規模利益を甘受出来る見通しは薄く、これに代わって質的向上あるいは付加価値率の向上に期待せねばならないであろう。

溶接技術も生産技術の一つとして、合理化省力化の一翼をになうが、個別生産形態における合理化要求に合致したものの開発が望まれ、また種々の面からの質的向上が要請されるものと考えられる。私共の経験に照しても、高張力鋼の適用範囲の拡大、Ni系合金や非鉄合金の導入、製品精度の向上、高性能下での構造物の信頼性の向上、現地溶接継手施工の増加、賃金上昇率に見合った生産性の向上、作業環境の改善等が挙げられ、これらに対応出来るように生産工程上の品質に対する工程能力の維持、改善が望まれる。

2. 溶接継手機能の評価

大型構造物・特殊構造物など新しい設計要件が付帯する仕事では、溶接継手の設計、あるいは、溶接継手機能の評価が構造形式あるいは詳細設計上重要な決め手となることが多い。一例として南港連絡橋では、トラス溶材の箱型断面の角継手のあり方が論議された。full penetrationであれば強度上十分であるが、厚板高張力鋼では施工が大変であり、精度上も難点があり必要条件からはoverに過ぎるものではないかまた部分溶込継手や片面溶接継手では生産性はよいが、安全性を評価することが仲々困難である。

同様の問題は、高層ビル鉄骨組立柱のシーム

継手についても起こっている。シーム継手は柱の局部挫屈直前に破断するものでもよいか、挫屈直後破断で十分か。局部挫屈後もかなりの変形に耐えるものを期待すべきか。

このような問題は、構造機能と、荷重条件、更に構造全体の破壊条件と継手の破壊条件との関連が明確化されることにより解決されるべきものであるけれど、現状では、構造機能の評価から、最終の継手の破壊条件まで結びつける間に断層があって、まとまり難いように思われる。一般の構造設計者は、構造計算あるいは応力計算を得意とするが、破壊条件とは接する機会が少ない。したがって、残留応力のような強い応力的覚乱条件の処置に苦慮することが多い。応力評価の手法が、破壊への距離測定の代用特性であるという原点にもどり考えることが要請される。継手の破壊条件の解明には stress ability と同様に strain ability の評価、局部剛性切欠部の延性の解析が重要かと思われる。部分溶込継手に対しては、root 部よりの割れの拡大条件の検討として、破壊力学で用いている K-value あるいは COD の考え方で評価するのもよいかも知れない。これらと一緒に FEM を併用すれば一層明確になると思われる。

実際に使用されている継手では、突合継手に比べ、隅肉や部分溶込継手はずいぶん劣性なものとしてあつかわれている。主応力継手はまずまずとしても、2次応力継手には検討不足なものが多い。このためずいぶん余分な溶接が行われているように思われる。

溶接継手の機能を上手に利用したものとしてハイブリッドな継手や、軟質継手、硬質継手の適用がある。異強度材相互の継手に従来は低水素な高強度側溶材が多く使われていたが、低強度側溶材の適用も増えており、溶接割れ防止策の一助となっている。隅肉継手では、所要剪断強度が保証出来るように配慮した上で、軟質溶材を用いて、施工性の改善が行われている。また横向姿勢では入熱が低く硬化しやすいので、軟質の溶材を適用して、適正な継手を得ることもある。硬質継手によって隅肉脚長を減じ、溶接歪を減らすことも十分検討された上で適用が

可能であろう。

鉄骨では高力ボルト、溶接併用継手もかなり多く見られるようになった。併用継手の評価はもともと strain ability の問題と思われるのでこの面から継手性能の評価方法が発展することを期待したい。

構造設計の良否によって溶接継手の経済効果あるいは生産性に影響する問題点として、各種の補強方法があげられる。補強を必要とする部分はもともと応力集中があるので補強するのであろうが、補強の形式によって付帯的二次応力集中が喚起される。種々の補強形式の中から選択する判断システムの確立が要望されるが、純力学的解決の外、美観的配慮が支配的な場合も多い。実際に cover plate や rib なしの厚板 Flange のような simple で生産性の高いものが割合と忌避されているが、技術的判断基準に明確さを欠くためと思われる。生産性の向上と継手形式の選択とは関連深いものと考えられるがこれについては、設計技術者と生産技術者との意見交換が組織的、体系的に進められる必要があろう。

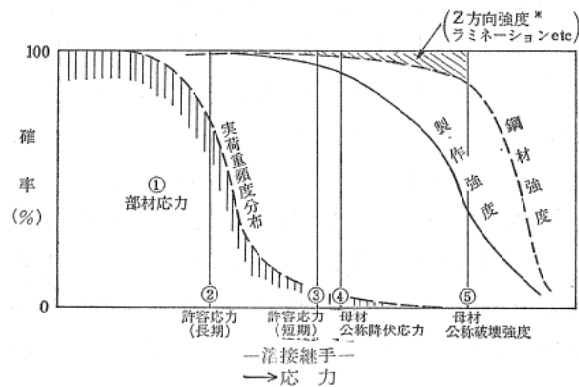


図1 構造物の破壊強度保障に対する考え方

溶接継手の機能評価の行きつくところとして構造物の強度と継手強度との相関あるいは技術的保障システムの問題が考えられる。母材の破壊応力と、継手の破壊強度、構造物の破壊強度の関連には現実的な破壊の確率上に大きな差がある一方、設計段階における母材公称破壊応力と公称降伏応力、許容応力（短期・長期）、試験荷重等の関連についても統一的な見解を欠いているように思われる。諸基準、規程に対する統一的な見解と、これらに忠実な設計と、製作

上の管理目標、管理限界との間の一貫した保障システムの数値的な検討評価が必要であろう。贅肉を除いて合理的に設計された構造物には、管理密度の高い施工が必要であって、このような施工条件による構造物の安全性に対する数理的評価手法が検討されるべきと思われる。

3. 生産現場の溶接技術論

生産現場の技術論は通常、製品個々の縦系列の技術問題を取扱ったものが多いが、溶接技術論においては、生産 process における個々の process の機能の再評価を論議してはどうかと思う。これらの論議として、溶接法選択論、開先論、予熱論、設備論、自動化論、精度論、管理論、システム論、教育論等があげられる。このような論議は新しい process を発展させる上で効果を発揮すると思う。

たとえば、開先論において、narrow gap あるいは、semi-narrow gap 溶接における間隙の大きさと、開先角度の大きさが、溶接金属の融合状態に及ぼす影響の検討が種々の要因、たとえば溶接法、溶接姿勢、溶接条件等について検討されることが期待される。通常の V・X 開先に対応する U・W 開先の再評価、部分溶込開先やメタルタッチ継手の適用に対する考え方、片面溶接の採用論議も展開されよう。

試みとして予熱の論議を進めてみたい。

まず、予熱の目的は何か。割れ防止であることが多い。この場合には、冷却速度緩和による HAZ の硬化の緩和、水素の拡散放出、収縮応力の緩和等が寄与しよう。残留応力の緩和を目的とすることも出来る。この時には、温度勾配の緩和、温度分布の調整が行える加熱冷却システムを考えるであろう。板厚差のある継手、線膨脹係数の異なる異材継手、収縮応力が異状に顕われる嵌込継手等での残留応力の緩和あるいはハイブリッド継手における prestress の導入等に適用されよう。

溶接の高速化のために予熱が使えるかも知れない。electro-slag 溶接の速度向上の手段として検討の余地がある。

融合不良防止のため予熱も行われている。異

材継手や、急冷しやすい厚板の初層 TIG 溶接等に見られる。

次に予熱温度の範囲はどうあるべきか。通常の予熱範囲は数 10℃ から 200℃ 前後位であり、鋳鉄等特殊なもので、数 100℃ 位迄あるが、このような通常の条件を逸した温度範囲での予熱の効用は考えられないであろうか。たとえば、high temperature welding の考え方はどうか。高速 narrow gap 溶接のような新しい溶接方法を実現するかも知れない。

Sub-zero welding あるいは予冷溶接というのはどうであろうか。歪防止に寄与することは十分考えられる。

加熱状態についても種々のものがある。全体加熱から局部加熱あるいは、開先内の予熱、周辺予熱、片部材の予熱、両面の予熱、表面のみあるいは裏面のみの予熱がある。割れ防止に対しては周辺予熱がよいかも知れぬが融合不良防止には開先内予熱でよく、また継手断面の急変に対しては片部材の予熱あるいは fallance heating といった考え方が必要であろう。その他、固定加熱方式と移動加熱方式あるいは短時間予熱方式と連続予熱方式等の相異が考えられ予熱の目的、対象、設備記画等によって左右される問題であろう。

予熱方法はどうか。従来は安値なが

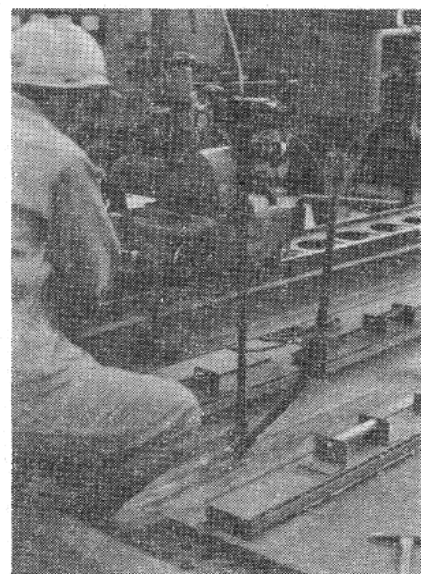


写真1 厚板HT80の鋼板の板継溶接作業、電熱予熱を採用してのサブマージアーク溶接

ス熔予熱が一般であったが、最近では、HT80等の超高張力鋼の溶接に、割れ防止の目的上、管理の容易な電気抵抗熱や輻射熱方式のものが用いられるようになって来ている。これらは当初設備費用の高価なことによって躊躇したものであるが、実際の適用によって予想効果を上廻るものがあり、急速に拡大適用されつつあるものである。これらの他、加熱ガス予熱、炉中予熱誘導加熱、アーク加熱等の方式が考えられ、特殊構造、特殊材料に適用が考えられる。

予熱設備の形式については、単体、連続体の違いがあり、被溶接物への固定法、あるいは装置の移動法の具体策が考えられる。予熱は作業環境としては悪要因であり、作業員との関連、溶接機との関連が重要であり、特に自動溶接の場合に溶接機器との関係が問題である。予熱装置の熱効率・容量といったものも検討されることは勿論であるが、温度制御の方式も施工管理の process 上重要である。通常、電熱方式の予熱では定温制御方式であり、予熱特性は测温技術によって左右されることが多い。これに対して、feed back 回路のない定入熱方式も加熱許容温度範囲の広い場合には簡便な手法であろう。

以上のような諸条件、諸要素に対応して、必要予熱温度の上限あるいは下限はどうあるべきかが一つの論点であろう。必要な予熱時間の考え方、予熱における入熱と、溶接における入熱との関係、さらに、温度分布、冷却速度、熱応力等の相互関係について、理論的な話がなされるであろう。

応用問題として考えるべき要素はかなり多い部材の寸法効果、継手の形状（突合せ、T、角継手、嵌込継手、管継手等）はもちろん、開先形状（I V V型、Fillet 等）によっても予熱温度が異なることは周知の通りであり、拘束度との関連も重要である。仮付溶接では局部予熱になる他、予熱と仮付溶接との time-lag も重要な要素である。多層溶接における層間温度の問題、溶接姿勢による相異、溶接法による相異等興味ある問題が多い。特に narrow gap 溶接、更に electron beam welding のような極小入熱溶接の

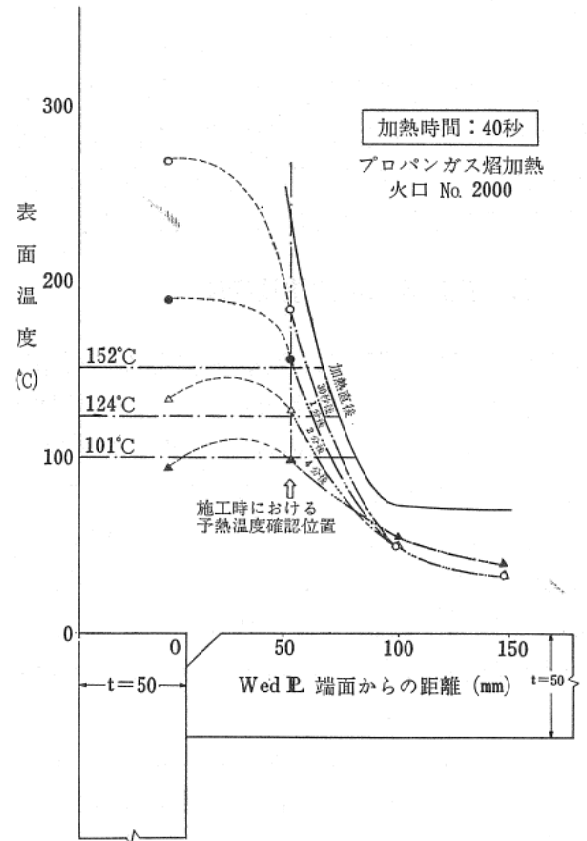


図2 予熱終了後の温度分布（加熱時間40秒、加熱域中央部）

場合の予熱条件は別途検討されるべきものであろう。

超高張力鋼における予熱・入熱と割れ・切欠靱性の関係は相互矛盾の要素であり、その適性条件が狭いことから、実際適用条件については応用上の詳細条件が検討されるべきものであろう。

異材継手、異板厚継手における温度調整問題は既に述べた所である。

これらの他、現場における適用条件として、風による冷却、対流の影響、外気温の影響等が考慮される。

品質保証の観点からは、管理の問題が極めて重要であり、予熱の定義、予熱の指示方式、予熱の計測における方法、時期、計測位置等が要点であり、予熱員の教育、管理体制、あるいは follow feed back といったシステムのあり方が問題とされよう。

以上の予熱に関連して横の関連問題を提起したが、他の論議においても種々の問題が飛び出

すであろう。

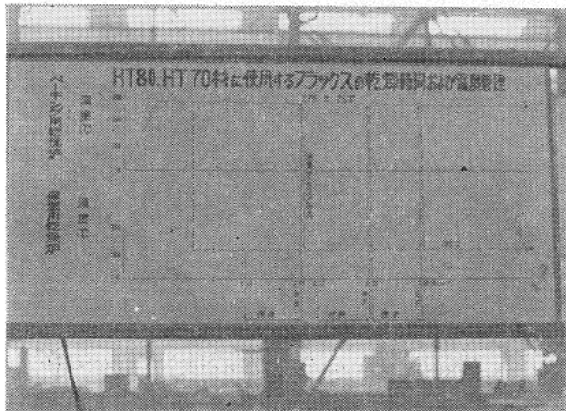


図3 高張力鋼用フラックスの乾燥管理と時間帯による払出し管理

4. 溶接の自動化、省力化

先に鉄構生産において、量的拡大の限界が見えて来たと言ったが、このことは、個別生産形態の硬直化をもたらすものと考えられる。先進米国における同種企業が10年来旧態依然としているのも、何かを暗示させるものである。

量産体制で採用される専用機の導入は、生産ラインのサブシステム合理化の問題解決策と直結するが、稼働率確保が最大の難問であろう。したがって、特例を除いては、汎用溶接機優位論が支配的であろう。ここ数年、ガスシールド半自動溶接機の普及が著しい。私共の単一事業部でも、炭酸ガス溶接機台数は約3年の間に、望んど零から300余台に達している。このため、全工場の自動化率も70%と高い値が達成されている。ガスシールドアーク溶接の適用は現状でよりは製品によってかなりむらがあるが今後、一般的となるであろう。この半自動機の普及も汎用機優位の一端を示すものであろうが、自動機としては、小型軽量のものの普及が著しく、更に、小型化を基盤とした多電極化が進行している。たとえば、水平隅肉用の小型機の普及から、2電の小型水平隅肉機の開発普及が着々と進行している。

この次に来るべきものは種々あるかと思われるが、1人多機運転の可能なものが要請される既に消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接機ではこの種のもが現われているし、今後、省力機

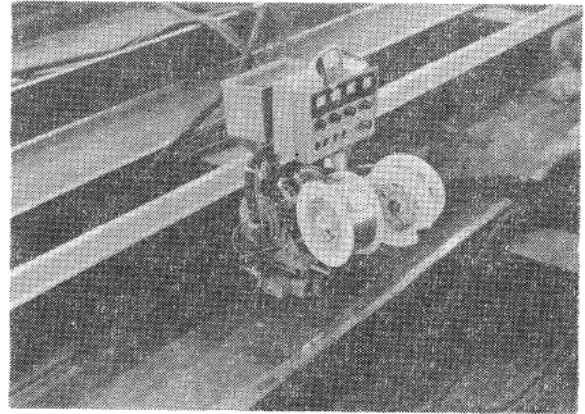


写真2 二電極小型水平隅肉自動溶接機の適用

としての各種機能の充足、たとえば、付帯機能の充足やNC化の進行等によって、多機運転が可能となろう。この種の機械としては、做い機構、フラックス回収等の付帯機能の充足が大切と考えられ、特に做いにおける検知器と、溶接終了時における自動停止機構の開発が重要な点と考えられ、さらに自動停止機構ではスカラップの検出、終端処理、廻し溶接の処理等の出来るものが漸次出現されよう。

次に構造物の大型化に対応した自動溶接機の開発が考慮されよう。マグトレサーを利用した立何隅肉自動溶接機等はこの範疇かと思われるが、さらに heavy weld に対応した大型機の出現も考えられる。質的向上の面では、自動化による品質向上が期待され、高級技能者対策としての自動化が考えられる。現在は特殊鋼等に採用されているパルスアーク溶接などの変成電流も、アーク制御方式の改善策として一般鋼のMIG溶接にも適用されるかも知れない。先に述べた予熱等付帯工事の合理化はもちろんであるが、環境改善のための諸設備の充実も急速に進むであろう。ヒューム、遮光、暑熱に対する対策並びに改善策は一般公害問題対策と平行して、労働環境向上の問題として close up されるであろう。

現在は質的なものに対する見直しの時代でもあり、品質向上から、品質保証体系の確立へと移り変わりつつあり、このことは、検査技術というものの位置付けを変えるものと考えられる超音波探傷技術の整備確立はもちろん、A、E

デルタ法等新しい技術への期待もあるし、作業の自動化と相まって、データの記録法、処理方式の改善が望まれる。

5. 現場接合の合理化

製品の多様化、大型化に従い現地工法においても、接合法の多様化、大ブロック架設工法の採用が進められている。

まず接合方式としての溶接の優位性が強調されよう。超高層ビル鉄骨、煙突、電波塔、水圧鉄管、貯槽等、現場溶接施工のものは多い。溶接工法としても種々のものが名告りを上げており、私共も直流細径ノーガスアーク溶接、CO₂狭開先溶接、CO₂円筒横向自動溶接、長尺消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接等を開発適用して来ている。高力ボルトと溶接併用継手も、溶接優位の顕われであろう。

大ブロック化は各種構造で見られ、たとえば橋梁、海洋構造物では大型起重機船による吊込

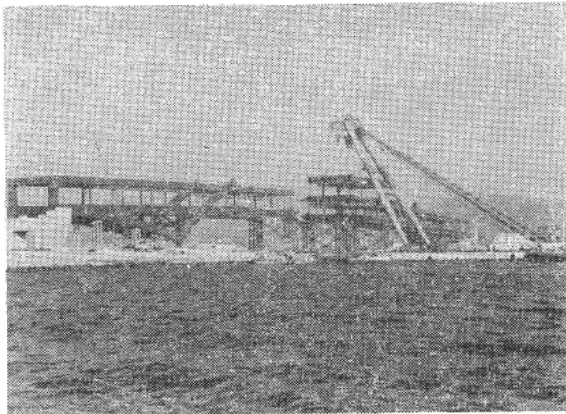


写真3 海上クレーンによる大型ブロックの架設、神戸大橋の架設工事

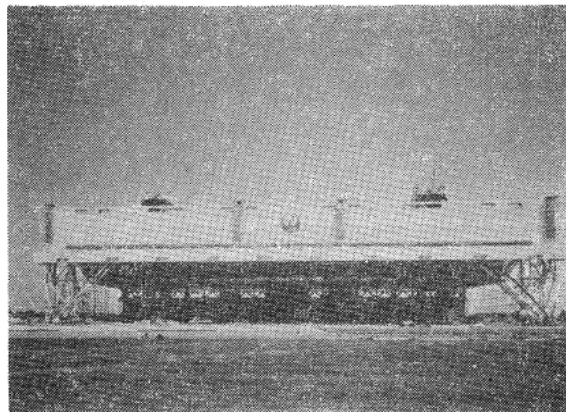


写真4 成田空港、大型ジェットハンガー大屋根のジャッキアップ

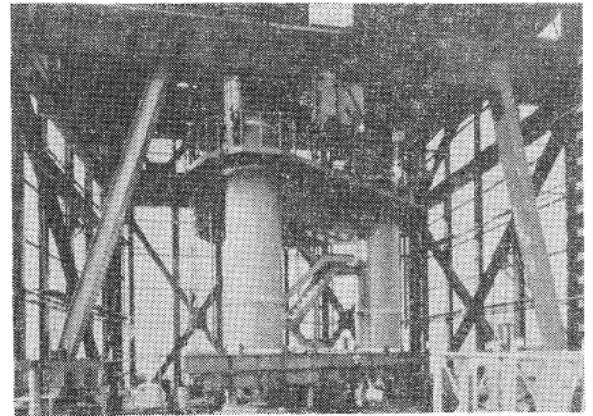


写真5 東電新橋鉄塔の現地CO₂自動溶接とジャッキアップ工法による架設の作業

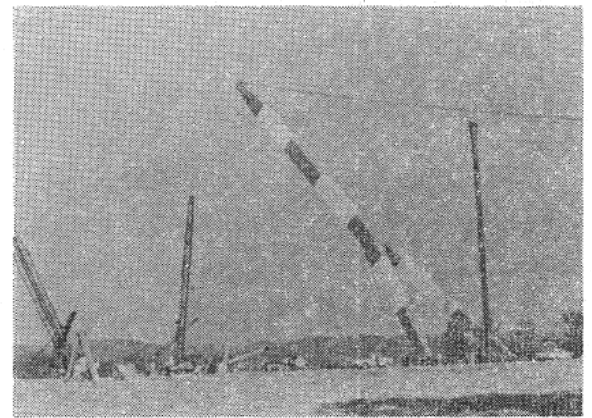


写真6 高さ 273 ft の鉄塔の自走起し作業、米国の 30"×2 条のガス配管作業現場

曳航が行われ、大屋根構造、鉄塔、煙突では jack up 工法があり、さらに橋梁の一括吊、塔の自走起し、超高層ビル鉄骨のパネルブロックによる架設、大型海構あるいは土木構造の進水曳航沈設のシステム等が多くなりつつある。このため、大型海上作業台、大型起重機船の台数も増加の一途をたどりつつある。

一方、公害防止、航路制限、騒音防止等の面からの現地工事の制約も多くなり、現地狭隘部での架設工法も種々考案されている。

以上のような諸条件に対応した溶接工法として工場溶接とは異なった側面から、溶接機の自動化が進められ、特に現場環境に合致した専用機の開発される余地が多く、また機械単独のみでなく、作業足場、電源、付帯設備を一体とした作業ユニットの開発利用が望まれる。