

信州大学審査学位論文

溶接ロボットによる建築鉄骨溶接の
狭開先化に関する実験的研究

2011 年 9 月

松村 浩史

目 次

論文要旨	1
第1章 序論	3
1. 1 はじめに	3
1. 2 現在のロボット溶接とその機能	4
1. 3 本研究の目的	5
1. 4 既往の研究とこの継手の狭開先化における課題	7
1. 5 本論文の構成	8
第2章 開先の組立精度の実態調査	11
2. 1 はじめに	11
2. 2 調査方法	11
2. 3 調査結果	12
2. 4 調査結果の考察	17
2. 5 本章のまとめ	17
第3章 直線継手における開先角度と初層溶接条件に関する検討	19
3. 1 はじめに	19
3. 2 開先角度 35 度での溶接手法を ベースとした初層溶接条件の検討	20
3. 2. 1 実験方法	20
3. 2. 2 実験装置	25
3. 2. 3 実験結果と考察	26
3. 2. 4 開先角度 35 度での溶接手法を ベースとした実験結果のまとめ	39
3. 3 振り子ウィーピングと拘束度を変えた試験体での 初層溶接条件の検討	40
3. 3. 1 本実験の概要と実験方法	40
3. 3. 2 振り子ウィーピングについて	43
3. 3. 3 実験結果および考察	47
3. 3. 4 振り子ウィーピングと拘束度の 異なる試験体を用いた実験結果のまとめ	65
3. 4 ルートギャップが広い場合の初層溶接条件	66
3. 4. 1 本実験の概要と実験方法	66

3. 4. 2	実験結果と考察	67
3. 4. 3	ルートギャップが広い試験体を用いた 実験結果のまとめ	77
3. 5	本章のまとめ	78
第4章 角形鋼管と通しダイアフラム接合部における		
	開先角度と初層溶接条件に関する検討	81
4. 1	はじめに	81
4. 2	本実験の概要	81
4. 3	実験結果	83
4. 4	考察	92
4. 4. 1	のど厚と溶接電流に対する高温割れ発生状況	92
4. 4. 2	角形鋼管と通しダイアフラム接合部の 溶接における溶接条件	94
4. 4. 3	溶込み形状係数と高温割れ発生の関係	100
4. 4. 4	開先の収縮とダイアフラムのかさ折れ変形	102
4. 5	本章のまとめ	108
第5章 角形鋼管と通しダイアフラム接合部の		
	開先角度 30 度および 25 度での全層溶接	109
5. 1	はじめに	109
5. 2	本実験の概要と実験方法	109
5. 3	実験結果	115
5. 3. 1	溶込み深さについて	118
5. 3. 2	軸方向の収縮について	119
5. 3. 3	各試験体の機械的性能と化学成分	120
5. 4	最大ルートギャップにおける全層溶接	123
5. 4. 1	本実験の目的	123
5. 4. 2	実験方法	123
5. 4. 3	実験結果	126
5. 5	本章のまとめ	128
第6章 結論		
6. 1	本論文の総括	129
6. 2	今後の課題	131

参考文献	133
------	-----

＜付録＞ 炭酸ガスを用いたパルス溶接の適用による ガスシールド性および連続運転性向上に向けた検討	137
1. はじめに	137
2. 炭酸ガスを用いたパルス溶接について	137
3. 実験方法	138
4. 実験結果	140
5. まとめ	147
参考文献	147

謝 辞

論文要旨

我が国の建築鉄骨構造には角形鋼管と通しダイアフラムを接合する構造を用いたものが非常に多く、この部材接合にはアーク溶接が広く用いられている。しかし、その作業は多くの時間とコストを要する。このため、この溶接の能率と溶接品質の向上を主な目的として、現在、工場内溶接の主に完全溶込み継手を対象とした溶接ロボットが、大手から中小までの数多くの鉄骨ファブリーケータに導入されている。中でも半自動溶接では対応しづらい角形鋼管や円形鋼管と通しダイアフラムの周溶接は、ロボット溶接が主流と言っても過言ではない。

ロボット溶接の特長は、アーク発生率が高く溶接作業時間を短くできることと、溶接条件のばらつきが少ないことによる品質の安定が挙げられる。特に半自動溶接では対応し辛い周溶接においては、円形鋼管だけでなく直線部とコーナ部が混在する角形鋼管においても、常に下向姿勢での連続溶接が行え、高能率で高品質な溶接を実現しやすく、溶接ロボットの導入が進んだ大きな要因となっている。

溶接作業は実際にアークを出している時間と段取りや後処理などアークを出していない時間の合算となるが、前述の高能率化の内容の多くはいずれも後者への対応であり、溶接継手の仕様は長らく裏当金方式の 35 度レ形開先のままで、前者への対応としてはロボット台数やトーチの本数を増やすなど、いずれも設備面での対応に留まっている。

一般的に施工面における生産性向上のアイテムの一つとして、ルートギャップや開先角度を狭くし開先断面積を小さくすることが挙げられ、溶接ロボットが普及するよりも古い 1970 年頃から建築鉄骨を含む各業界で狭開先溶接の検討が行われきたが、建築鉄骨の溶接ロボットが対象としている完全溶込み継手に関して言えば、狭開先化の状況は乏しく、SRC 構造や仕口溶接のような直線継手の半自動溶接において、25 度開先での検討結果がいくつか報告されているものの実施工での普及には至っていない。これは、「初層の高温割れ」、「シールドノズルと母材の干渉」、「シールド性能の確保」、「組立溶接の難しさ」といった課題がある狭開先施工においては、シビアな組立精度と狙い位置精度が要求されるが、半自動溶接ではトーチの保持や狙い位置、突き出し長さ、溶接速度など、様々な溶接を行う上でのパラメータが作業者の技量に依存するため、繰り返しかつ継続して同じ溶接を実現することが難しく、歩留まりがよくないということが考えられる。また、この溶接継手は柱全体の寸法調整を行う継手であり、ルートギャップの変動が大きいことも施工を困難なものにしている。一方、ロボット溶接の狭開先化については、ロボット溶接が半自動溶接の置換えという形で発展してきた経緯と、ベースとなる半自動溶接での狭開先化が普及しないことからその研究報告はほとんどされていない。しかし、作業員依存の半自動溶接に対し、ワイヤ突き出し長さや狙い位置精度が保ちやすいロボット溶接では、施工条件を安定させることができ、かつ、限定した施工条件範囲で溶接することも可能と思われ、施工上の課題をクリアしやすいと考える。

本研究は上記のように日本の建築鉄骨製作において重要な役割を果たしているロボット溶接施工において、開先角度 35 度のとときと同程度の造りやすさで、より一層の低コスト／短時間での製作を実現し、かつ、溶接品質ならびに溶接作業におけるヒューム発生量や炭酸ガス排出量の削減といった環境負荷低減を目的とし、開先角度を狭くすることを実験的に検討し、その施工性という観点において最適な開先角度と施工条件を提案するものである。

以下、本研究で実施したことの概要を述べる。

- (1) 現在、開先角度 35 度の溶接において溶接ロボットを適用している鉄骨ファブリケータにてルートギャップを調査し、その結果から実用性の高い狭開先溶接を検討するにあたってのルートギャップ範囲を 4mm～10mm とした。
- (2) 狭開先溶接において最も重要視すべき初層の高温割れの防止と溶込み深さの確保を主眼として、開先角度を 20 度から 30 度に設定した裏当て金方式レ型開先の直線の試験体を用い、ロボット溶接を想定した初層の施工条件範囲に関し、継手の拘束度と開先の収縮に着目した実験を行い、当該継手の高温割れ発生は継手の拘束度が大きく影響し、溶接ひずみによる開先の収縮および変形度合いにより適切な溶接が行える範囲に違いがあることを確認し、継手形状と開先角度に応じた施工条件範囲を示した。また、狭隘部での溶接を行うにあたり、従来のトーチ姿勢を変えない平行ウィービングから振り子状にトーチを傾けながらウィービングさせることを提案し、開先角度が小さくなった場合でも、トーチと開先の干渉を回避しつつ、適切な溶接が行えることを示した。
- (3) ロボット溶接が最も多く用いられている角形鋼管と通しダイアフラム接合部について前記施工条件の適応性、平行部とコーナ部の違いについて実験にて確認するとともに、実験結果に対応する部材の変形状況を F E M にて検証した。
- (4) 総合的な施工条件の検証として、溶接ロボットが最も多く用いられている角形鋼管と通しダイアフラム接合部の開先角度 30 度と開先角度 25 度について全層溶接を行い、内部欠陥の発生状況、溶接継手の機械的性能、および化学成分分析からその実用性を確認した。

第1章 序論

1.1 はじめに

我が国の建築物は、鉄骨構造（S造）を用いたものが非常に多く用いられている、図1-1に示すように構造別の着工面積比で見ると、S造は37%を占めている。

この建築鉄骨の接合にはアーク溶接が広く用いられている¹⁾²⁾が、その溶接作業は多くの時間と製造コストを要する。このため、この溶接の能率向上と溶接品質の安定／向上を主な目的として、1980年代後半から仕口部の角形鋼管と通しダイアフラム接合部の溶接、いわゆるコア溶接を対象とした溶接ロボットが用いられはじめた²⁾。図1-2はS造の中でも広く普及している角形鋼管柱の工場内溶接の一般的な工程を示したものであるが、1本の柱はこの図のように、コア溶接、仕口溶接、柱大組立溶接という工程で製作される。当初、コア溶接工程を対象としてスタートしたロボット溶接は、現在、この柱部材の3つの製作工程すべてを対象としており³⁾、その中でも半自動溶接では作業し辛く、かつ、継手当たりの溶接量が多い角形鋼管および円形鋼管と通しダイアフラムの周溶接は、ロボット溶接が主流と言っても過言ではない状況となっている³⁾⁴⁾。周溶接におけるロボット溶接の大きな特長は、円形鋼管はもちろんのこと、直線部とコーナ部が混在する角形鋼管についても、常に下向姿勢での一周連続溶接⁵⁾⁶⁾が可能なことで、これにより半自動溶接と比較して能率面だけでなく品質面においても溶接欠陥が発生しにくく、溶接ビードの外観もきれいで安定した溶接を実現しているなど、能率と品質の両面において優位性があることが溶接ロボットの普及に繋がった要因と考える²⁾。

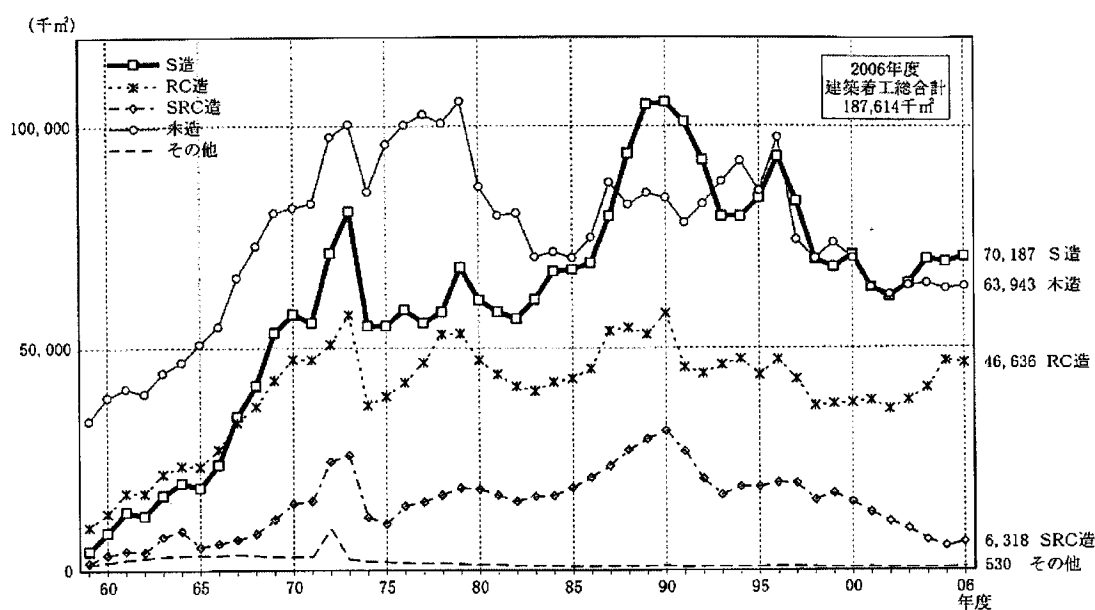


図1-1 構造種別着工床面積の年度別推移（建築統計年報より）

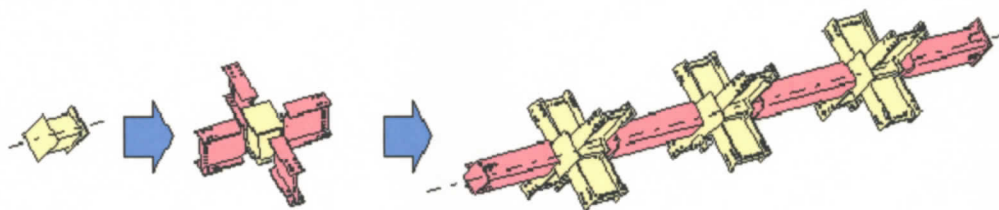


図 1-2 角形鋼管柱の工場内溶接の一般的な工程

1. 2 現在のロボット溶接とその機能

溶接ロボットが対象としている継手の多くは、溶接量の多い完全溶込み継手であり⁷⁾、ほとんどのケースで裏当金方式の35度レ形開先が用いられている⁸⁾。図1-2に示した3つの工程においても同継手が用いられており、鋼材の精度、加工誤差、組立誤差の補正を裏当金で行うため、ルートギャップには少なからずばらつきが生じる。

これに対し、溶接ロボットは、本来、教示した通りにしか動作することができないため、ワークの形状や位置が異なれば、狙い位置ずれによる溶接欠陥が生じる。そこで部材の取り付けや組立精度が不十分なことによるワークのずれを補正する手段として、センシングが多用されている。基本的なセンシングはワイヤタッチセンサ⁹⁾とアークセンサ⁹⁾の2種類で、建築鉄骨のロボット溶接においても重要な機能となっている¹⁰⁾¹¹⁾。

現在、広く適用されている建築鉄骨向け溶接ロボットは、まず、溶接前に図1-3に示した開先部のセンシング動作例のように、複数のワイヤタッチセンサにより得られる位置情報とインプットされたワーク寸法を演算処理することにより、センシング位置断面におけるルートギャップや溶接線の位置を測定し、それに応じて溶接電流、アーク電圧、溶接速度、ウィーピング幅、ウィーピング回数、狙い位置などを変えて溶接する⁵⁾⁷⁾。また、これを同一溶接線内で複数箇所行い、その実施区間内を補間することで線形に変化するルートギャップにも対応する。さらに、局所的なセンシングでは補正できない湾曲した開先などの非線形な溶接線や、溶接中に発生するひずみによる溶接線のずれを補正する手段としてアークセンサが用いられている。アークセンサとは溶接中にウィーピングしながら、溶接電流の変化をフィードバックし、ワイヤ突き出し長さと溶接電流が反比例することを利用して溶接線の位置を検出するもので、溶接線の左右方向の位置ずれを補正する左右倣いと上下方向の位置ずれを補正する上下倣いがある¹¹⁾。溶接ひずみによる母材の変形や開先の収縮などは板厚やワーク形状によっても変化するため予測が困難であり、リアルタイムで補正していくアークセンサの効果は非常に大きい。これは狭開先溶接においても重要な機能と考える。

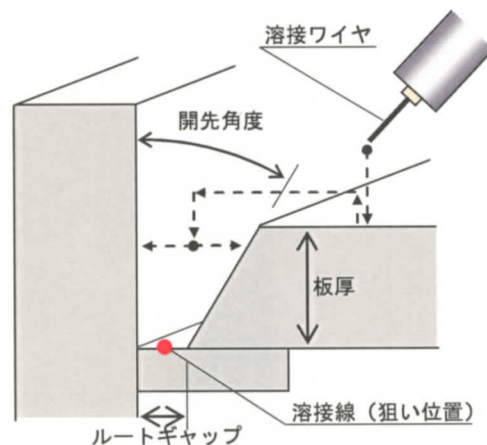


図 1-3 開先部のセンシング動作例

1. 3 本研究の目的

前述したように、溶接ロボットの特長とセンシング機能を駆使したロボット溶接の普及率は非常に高く、このロボット溶接が一般化した現状においては、更なる生産性向上が望まれている段階に達している。溶接作業はアークが発生している時間と段取りや後処理などアークを出していない時間の合算となるが、前述の高能率化の内容の多くはいずれも後者への対応であり、前者への対応としては、例えば、図 1-4 の 2 台の溶接ロボットで 1 本の柱を同時に溶接するロボットシステム⁵⁾⁶⁾や、1 台の溶接ロボットに 2 つのトーチをまとめて配置したタンデム溶接を行うロボットシステム¹³⁾のようにロボット台数やトーチの本数を増やすなど、いずれも設備面での対応に留まっている。これに対して溶接継手の方は、半自動溶接／ロボット溶接に関わらず、長らくの間、裏当て金方式の 35 度レ形開先が変わらず用いられているままの状況にある。

本研究は、こういった状況を鑑みたものであり、日本の建築鉄骨製作において重要な役割を果たしているロボット溶接施工において、より一層の低コスト、短時間での製作を実現し、かつ、パス数が減少することによる溶接欠陥発生率の減少、総入熱量の減少による溶接接合部の品質改善、ならびに溶接作業におけるヒューム発生量や炭酸ガス排出量を少なくできるといった環境負荷低減を目的として実施するものである。

狭開先化による効果には、一般的に開先断面積の縮小によるアーク発生時間の短縮と溶接材料の低減が挙げられる¹⁴⁾が、ロボット溶接においては、ノズルの交換や清掃¹⁵⁾などの非溶接時間の短縮によるサイクルタイムの短縮も追加して考えることができる。図 1-5 は、角形鋼管と通しダイアフラム接合部について、開先角度 35 度を 100%とした場合の開先角度 30 度／25 度／20 度での時間的効果を、ルートギャップ 4mm における断面積比率とサイクルタイム比率について試算したものである。このように断面積は、板厚に反比例して小

さくなり、アークタイムの短縮が期待できるが、板厚が薄い場合には断面積の縮小効果は小さくなる。一方、サイクルタイムで見ると、アーク発生率が低くなりがちな 16mm や 19mm といったやや薄めの板厚については非溶接時間比率が大きいいため、狭開先化によってパス数が低減できることによる非溶接時間の短縮により、タクトタイムの短縮率は大きくなる。板厚が厚いものに対して開先角度を小さくするとアークタイムの面で大きな効果があることは言うまでもないが、板厚 16mm 以上においては 5 度程度の狭開先化であっても、溶接工程の生産時間短縮効果は 10% 以上が見込めることが分かる。このようにロボット溶接において狭開先化を実現し得る施工条件を見出すことは、建築鉄骨溶接の生産性向上に大いに寄与するものと考ええる。



図 1-4 ロボット 2 台での同時溶接

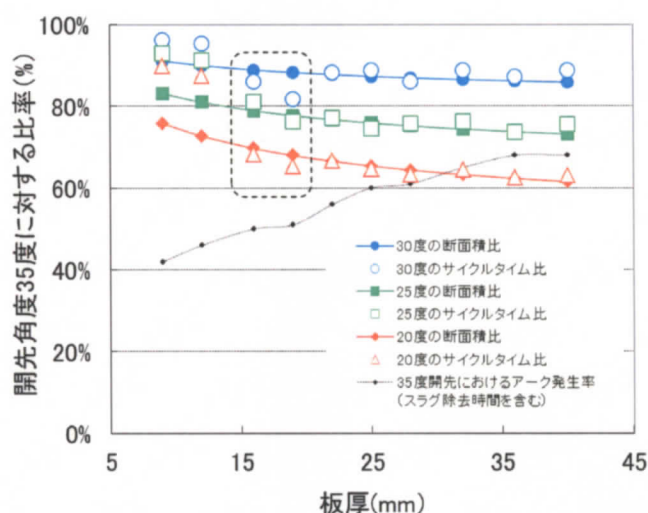


図 1-5 35 度開先に対する断面積およびサイクルタイムの比較

1. 4 既往の研究とこの継手の狭開先化における課題

一般的に開先のある溶接継手の施工面における生産性向上のアイテムの一つとして、ルートギャップや開先角度を狭くするか、もしくはレ形開先をI型開先にして開先断面積を小さくすることで溶接量を削減することが挙げられる。実際、溶接ロボットが普及するよりも古い1970年頃から建築鉄骨を含む各業界で狭開先溶接の検討が行われ、特殊な施工法として圧力容器やパイプ配管の溶接などに適用されている¹⁴⁾¹⁶⁾。例えば、溶接直前に溶接ワイヤを波状に曲げて溶接ワイヤが左右に振れることで狭隘部の溶接を行う波状ワイヤ式狭開先溶接装置¹⁷⁾や屈曲ワイヤ式狭開先溶接装置¹⁸⁾があり原子炉圧力容器やボイラの格納容器に適用されたとの報告がある。また、サブマージアーク溶接では通常の装置のまま適用しやすいこともあり、鉄骨のボックス柱の角溶接にも適用されているとの報告がある¹⁹⁾。しかし、これらは専用の装置や材料を用いるものやMIG溶接、TIG溶接を用いるものなど、安価で汎用性があるとは言いがたく、要求される開先精度も厳しい¹⁴⁾ことから、現在、建築鉄骨でロボット溶接を行っている継手への適用は難しい。一方、低コストと施工の安定性が重要視される建築鉄骨の溶接では、ほとんどのファブリケータで炭酸ガスアーク溶接が用いられており^{20)~22)}、それは裏返して言えば、前述の特殊な施工方法は鉄骨溶接には適さないとも言える。

本研究の対象とする建築鉄骨の工場内溶接における完全溶込み継手に関して言えば、狭開先化の状況は乏しく、SRC構造や仕口溶接のような直線継手の半自動溶接において、25度開先での検討結果^{23)~25)}がいくつか報告されているものの実施工での普及には至っていない。さらに半自動溶接の代替手段として発展してきたロボット溶接では、35度レ形開先継手が対象となっており、建築鉄骨の狭開先化に関する研究事例はほとんど報告されていない。

半自動溶接による狭開先施工の検討報告では、開先角度25度のルートギャップ $5\text{mm} \pm 1\text{mm}$ という範囲において、実験的に削り込んだシールドノズルを用い、初層でウィービング法を適用せず、溶接線に対して真っ直ぐにトーチを動かすストレート法を用いるなどによる施工結果が報告されている²⁶⁾。しかし、「初層の高温割れ」、「シールドノズルと母材の干渉」、「シールド性能の確保」、「組立溶接の難しさ」といった課題がある狭開先施工においてはシビアな組立精度と狙い位置精度が要求されるが、半自動溶接ではトーチの保持や狙い位置、突き出し長さなど、様々な溶接を行う上でのパラメータが作業者の技量に依存することになり、溶接結果もそれに依存してしまうため、継続して同じ溶接品質を得ることが難しいという課題も残る^{23)~26)}。

また、半自動溶接／ロボット溶接によらず、この継手の特徴として、柱全体の寸法調整を行う継手²⁷⁾であり、ルートギャップの変動が大きくなることが予想されることから、実ワークに適用するためには、そのばらつきに対応する手段が必要であり、それも実用化とその普及の障壁となっているものと思われる。

一方、ロボット溶接は狭開先化の検討報告もない状況であるが、これはロボット溶接が半自動溶接の置換えという位置付けで発展してきた歴史と、ベースとなる半自動溶接における狭開先化が普及しないことに加え、半自動溶接のように狭い溶接部に溶接トーチを持って行って溶接する際、アークやトーチ周り状況をリアルタイムに視覚的に判断しながら溶接できず、また、ノズルを母材に擦り付けながら溶接するようなこともできない状況において、溶接ひずみにより意図せず移動する溶接線への追従とロボット溶接では大きな特長であり効果である「連続運転性能」を確保する必要があるといったロボット溶接に求められる特有の課題の存在も挙げられる。

しかし逆に、ロボット溶接の利点という見方をすれば、作業者の技量に依存する半自動溶接に対し、ロボット溶接は施工条件を安定させることができる。つまり、ワイヤ突き出し長さを安定させ、狙い位置精度を高く保てるロボット溶接では、施工条件範囲を半自動溶接よりも限定して溶接することができるものとする。

よって、本研究では日本の建築鉄骨製作において非常に重要な役割を果たしているロボット溶接施工において、開先角度 35 度のときと同程度の造りやすさで、より一層の低コスト、短時間での製作を実現し、かつ、溶接品質ならびに溶接作業におけるヒューム発生量や炭酸ガス排出量の削減といった環境負荷低減を目的とし、溶接ロボットを用いた狭開先溶接について実験により検討し、その施工性という観点において最適な開先角度と施工条件を提案する。

1. 5 本論文の構成

第 1 章では、本研究を実施するにあたっての背景および目的と、建築鉄骨におけるロボット溶接の現状、狭開先溶接に関する既往の研究と鉄骨溶接における課題、本論文の構成について述べる。

第 2 章では、溶接ロボットによる狭開先溶接技術を実用化できるものにするべく、開先角度 35 度にて実際に溶接ロボットを適用している鉄骨ファブrikエータにおいて、実物件でのルートギャップを調査し、適応しておくべき範囲について検討する。

第 3 章では、建築鉄骨で用いられている裏当て金方式のレ形開先継手の狭開先化の検討として、開先角度を 20 度から 30 度に設定した直線継手の試験体において、ロボット溶接を想定した初層の施工条件範囲に関する実験を行う。実験は継手の拘束度や開先の収縮に着目して行い、高温割れが発生しないことや溶込み深さを確保できることといった初層溶接に求められる要件を満たす適正な施工条件範囲や、開先角度による違いについて検討する。

第4章では、前章で行った直線継手の試験体で得られた知見を踏まえ、ロボット溶接が最も多く用いられている角形鋼管と通しダイアフラム接合部の周溶接の狭開先化を目的として、同継手を模した試験体を用いて初層溶接条件の実験を行い、適正な施工条件範囲や、角形鋼管の平行部とコーナ部の違いについて検討するとともに、溶接による部材の変形をFEMを用いて検証する。

第5章では、第4章までの結果を踏まえ、角形鋼管と通しダイアフラム接合部を模した試験体を用い、開先角度30度および開先角度25度について全層溶接を行い、内部欠陥の発生状況、溶接継手の機械的性能、および化学成分分析からその実用性を確認する。また、開先角度の違いや溶接順序の違いによる継手収縮への影響／効果についても検討する。

第6章「結論」では、本研究の総括と本研究に関わる今後の課題について述べる。

