下向溶接用鋼スタッドの横向溶接への適用に関する基礎的研究*

中世古 圭基**, 内田 拓磨***, 鈴木 実平****, 川上 博士****, 尾崎 仁志****

A Study on Horizontal Stud Welding by Using Steel Stud for Flat Welding*

by NAKASEKO Yoshimoto **, UCHIDA Takuma ***, SUZUKI Jippeï ****,
KAWAKAMI Hiroshi **** and OZAKI Hitoshi ****

In recent years, manufacturing sites have strongly requested for the steel stud with large diameter to be welded in the horizontal position, which is difficult because of gravity. In this study, the steel stud of 19mm in diameter was welded horizontally to the mild steel plate by using ferrule for usage in flat position. As results two kinds of weld defect were observed; lack of fusion and blowhole. The former occurred in the welding condition of too small or too large heat input, and the latter did in the range of longer arc time. Therefore, the suitable welding condition could be found in the large current and shorter arc time. When the areal ratio of weld defect to the cross section of stud was lower than 10 percent, the welded joint had enough static strength.

Key Words: Steel stud, Large diameter, Welding position, Horizontal position, Ferrule

1. 緒 言

アークスタッド溶接は、板（母材）と棒状の部材（スタッド）との間にアークを発生させ、その熱で母材上に形成された溶融池の中へ先端部が溶融しているスタッドを押し込んで両部材を融接する。アークスタッド溶接は、水平な母材にスタッドを垂直に溶接する下向溶接姿勢で主に用いられている。しかし近年、溶接姿勢の変更が困難な大型構造物や、既設の対象物に施工する場合などにおいて、下向溶接姿勢以外の溶接施工の必要性が生じている。対象物の大型化や高強度化を反映して溶接されるスタッド直径が増大している。

スタッド溶接は構成上の制約から、1回のアーク加熱によってスタッド断面より大きな溶融池を母材上に形成しなければならない。したがって、下向以外の溶接姿勢では、溶融池内の多量の溶融金属が重力によって垂れ落ちるために健全な継手を得ることが難しくなる。この困難さはスタッドの大型化によってさらに増大する。大径スタッドの推奨溶接条件は下向溶接では直径25mmまで、横向溶接では

直径16mmまでが提示されており、下向以外の溶接姿勢で使用可能なスタッド直径は小さく制限される。

スタッドの押込みによって溶融池から排出される溶融金属は、母材とスタッド側面との隅部に余盛（カラー）を形成する。このカラー形成はスタッド継手に対する外観評価基準となっており、下向姿勢ではカラー形成が比較的容易なため、大きなカラーがスタッド全周囲に形成されることが要求されている¹⁾。下向以外の溶接姿勢では大量の溶融金属の保持が困難であり、十分なカラーが形成されなかった溶接部に対して別の溶接法で溶接補修を試みる研究も報告されている²⁾。

そこで本研究では、推奨条件が明らかにされていない、直径19mmの頭付きスタッドの横向溶接における困難性の実態を明らかにし、大径スタッドの横向溶接部の健全性を改善するための指針を得ることを目的とした。

2. 実験方法

2.1 スタッドの溶接方法

溶接実験には供試材として、スタッドは直径19mmの頭付きスタッド（JIS B 1198）を使用し、母材は一般構造用圧延鋼材（JIS SS400；100×70×16mm）を使用した。市販の手持ち式溶接ガンを治具で水平に保持した。溶接電源は容量2.5kAの直流溶接機であり、横向姿勢、正極性（スタッド負極－母材正極）で溶接した。また、フェルルールは下向溶接用のものを使用した。

大電流アークを安定して発生させるために、所定の溶接電流の通電に先立って若干電流値の低いアーク（パイロッ

*受付日 平成28年3月18日 受理日 平成28年8月30日

**学生員 三重大学大学院 Student member, Graduate School of Engineering, Mie University

***学生員 三重大学大学院（現在カヤバシステムマシナリー株式会社） Student member, Graduate School of Engineering, Mie University (Present Address: Kayaba System Machinery Co.,Ltd)

****正 員 三重大学大学院 Member, Graduate School of Engineering, Mie University

トアーク)を0.1s間発生させた後に、所定の値まで溶接電流を増加させる。パイロットアークの電流値および保持時間は1.2kAおよび0.1sで全ての溶接実験で一定とした。溶接中の電流値および電圧値の平均をFig.1に示す。溶接電源の電流の設定値1.5, 2.0, 2.5kA(破線)に対して、実測値の平均は1.53, 2.05, 2.58kA(○, △, □印)であった。溶接毎の電流値の変動は少ない。一方、電圧値はスタッド端部の溶融による形状変化や溶融金属の揺動に影響され、図に示すように溶接毎にかなり変動した。設定電流値1.5, 2.0, 2.5kA毎の電圧の平均値は34Vではほぼ一定である。

溶接時のスタッドの動きをFig.2に示す。溶接ガンの可動部であるスタッド固定用コレットはスタッドと一体で動くので、スタッド固定用コレットに取り付けた反射板の動きをレーザ変位計で測定してスタッドの動きとした。溶接実験の開始時まではスタッド先端に埋め込まれている高さ1.5mmの点弧用アルミニウム球が母材表面に接触している(図中a)。スタッドの引き離し距離は2.5mmとした。点弧用アルミニウム球はアーク放電開始と同時に溶融すると考えられるから、溶接開始時のスタッド引き離し直後のアーク長は $1.5+2.5=4\text{mm}$ である(図中b)。

所定時間アークを保持して母材表面およびスタッド端部を溶融させた後、スタッドを母材へ押し付けて回路を短絡させてアークを消滅させる。スタッドを母材に押し込む量の設定値を溶け代と呼ぶ。本実験では溶け代を5mmに設定した(図中c)。図中cの距離は設定値の5mmにならない場合がある。そこで溶接開始時と溶接終了時とのスタッドの位置の差を押し込み距離とした。スタッドが母材に近づく方向を正方向とした。溶接開始時にはスタッド端面は母材表面からアルミニウム球の高さ分(1.5mm)離れた位置にあるので、実際に押し込まれるスタッドの量は、押し込み距離から1.5mmを引いた値となる。スタッドの押し込み後、電流を0.2s間流した(ポストヒーティング)。

2.2 スタッド継手の評価方法

溶接完了後にカラーの形状を目視で観察し、カラーが形成されている範囲を測定した。国土交通省が定める道路橋

Fig.1 Change in mean arc voltage during stud welding at various currents

示方書¹⁾および一般社団法人スタッド協会の技術検定試験の判定基準²⁾に基づいて、Fig.3(a)に示すように、高さ1mm、幅0.5mm以上の余盛がある部分をカラーが形成していると判定した。カラーが形成された範囲をスタッド周囲360度に対する角度として測定し(Fig.3(b))、これをカラー角度と呼び、カラーの形成程度の指標として用いた。

スタッド溶接継手の引張試験を実施するために、スタッド頭部を固定する治具および70×60mmに切断した母材を水平に固定する治具を試作した。2つの固定治具を油圧式万能試験機に装着し、スタッドを母材と直角方向に引き抜くように引張り、破断時の最大荷重を計測して継手引張強度とした。

溶接金属で破断した試験片については破面上の溶接欠陥を直接観察した。スタッド軸部で破断した試験片については、溶接部の放射線透過試験を実施した。母材を裏面から切削加工して厚さ6.5mmとし、引張試験後に残っているスタッド軸部を母材表面から6mmの高さまで切削加工した。全体で12.5mmの厚さに減厚した溶接部を撮影(160kV-60s)し、写真から確認された気孔および未溶融部分の投影面積を測定した。

Fig.2 Motion of stud during welding process

Fig.3 Criterion of collar and measuring method of angle of collar

Fig. 4 Influence of welding parameters on plunging distance and collar angle

Fig. 5 Examples of current and voltage waveforms in case of short circuit with welding current of 1.5 kA for different arc time

3. カラーの形成と押込み距離

電流値とアーク時間を変化させて溶接し、溶接時の押込み距離および継手のカラー角度を Fig. 4 の上 3 図および下 3 図に示す。図中の●印は個々の電流値における測定値を示し、○印と折れ線は同じアーク時間における実験の平均値を示す。いずれの電流値においても、アーク時間の増加に伴って押込み距離は増大し、極大となってから減少する。溶け代とアルミニウム球の高さを考慮すると、押込み距離の設定値は 6.5 mm となる。この設定値を図中に破線で示す。アーク時間が短くスタッド及び母材表面の溶融が不十分な場合には押込み距離は設定値に達しないが、アーク時間の増加に伴って増大して設定値に近づく。押込み距離が極大

となるアーク時間は溶接電流 1.5, 2.1 および 2.6 kA の場合、それぞれ 1.4, 1.0 および 0.5 s であり、電流値の増加に伴って短時間で設定値に近づいていることがわかる。

押込み距離が極大となる時間を超えてアーク時間が増加すると、いずれの溶接電流値においても押込み距離が減少する。この現象は溶接中の電気回路の短絡が関係していると考えられる。電流値および電圧値の測定例を Fig. 5 に示す。Fig. 5(a) は溶接終了時まで短絡が回復しなかった場合であり、Fig. 5(b) は短絡後にアーク放電が再開した場合の例である。同図に示すようにアーク電圧は 25～40 V の間である。短絡が起きると、電流値は維持されたまま、電圧値が急激に低下する。本研究ではアーク時間内で電圧値が 10 V 以下に低下した時点を短絡発生と判定した。短絡の発生状況を Fig. 6 に示す。図の横軸は短絡の開始時刻であり、縦軸は短絡が発生している時間である。図中の白抜きの記号はアーク放電が再開した短絡を示し、中塗りの記号は溶

接終了時までアーク放電が再開しなかった短絡を示す。各溶接電流値において最も短いアーク時間で観察された短絡を図中に矢印で示す。同図より明かなように、短絡現象は溶接開始から矢印で示す時間までは発生しない。この時間は電流値の増加に伴って短くなる。

短絡中も溶接電流は一定に保たれるが、電圧値は3V以下まで低下する。従って短絡中は、放電アークから供給される熱がなくなりジュール発熱だけが起こるので、溶融部に供給される熱量が激減する。短絡中の電流は短絡部を集中的に流れ、短絡面積が小さい場合には短絡部の電流密度が大きくなるので短絡部が激しく加熱され、温度上昇で短絡部が飛散することによって、アーク放電が再開する(Fig.5(b))。短絡面積が大きい場合には電流密度がさほど大きくならないので温度上昇が抑えられるため短絡が持続する。発熱量が小さい期間が長く続いたために溶融よりも凝固が優先していると考えられる。このために溶接開始からの経過時間が短く溶融金属の量が少ないとアーク放電が再開しやすい。溶接開始からの経過時間が長いと溶融金属の量が多くなりアーク放電が再開しにくくなる。その結果としてアーク時間の長い溶接において押込み距離が減少すると考えられる。

下向溶接では標準条件で幅2.5mm、高さ7mmのカラーが全周にわたって形成される。しかし、本実験で実施した横向溶接では360°にわたってカラーが形成される溶接条件は見いだせなかった。カラー角度を測定した結果を、Fig.4の下図に示す。アーク時間の増加に伴うカラー角度の変化と押込み距離の変化とは大まかに一致している。全般的に押込み距離はアーク時間の増加に伴って増大し、極大を示した後に減少する。一方、カラー角度のアーク時間の増加に伴う変化は、電流1.5kAの場合では増加傾向だけを示し、電流2.6kAの場合では減少傾向だけを示す。電流2.1kAの場合にはアーク時間の増加に伴って増加し、極大を示した後に減少するが、カラー角度が極大となる時間は押込み距離が極大となる時間の範囲とは一致していない。押込み距離とカラー角度とが明瞭な相関関係を示さない理由としては次の2点が考えられる。

1点目は、溶融金属の一部が溶接部から脱落したことである。本実験では下向溶接用のフェルールを横向溶接に適用している。フェルールとスタッドとの間にある空隙は、Fig.2に示したように、内径19mm、外径24mm、長さ7mmの管状形であり、その体積は 1400mm^3 である。この体積を直径19mmのスタッド軸部の長さに換算すると4.9mmとなる。そこで、全ての溶融金属がカラー形成に寄与するなら、押込み距離が $4.9+1.5=6.4\text{mm}$ (1.5mmはアルミニウム球の高さ)に達した時に、押込みによって排出される溶融金属がフェルールの空隙に充填されて全周にわたるカラーが形成されることになる。しかし実際には溶融金属の一部がフェルールのガス抜き用の凹部から脱落する。

2点目は、高さ1mm、幅0.5mm以上の余盛をカラーと

して定義したことによる。この定義に従ってカラー角度を測定しているため、フェルールの空隙部へ溶融金属が完全に充填されなくてもカラーが形成されていると判定する場合がある。

上記の理由で、押込み距離とカラー角度にはある程度の関連性が認められるが、両者の間には完全な対応関係がないと考えられる。

4. 溶接部欠陥および継手強度

外観検査の良否にかかわらず全ての継手の引張試験を実施し、静的な継手引張強度を測定した。試験片の破断位置はスタッドの原質部(溶接熱影響部から離れたスタッド軸部)および溶接部であった。溶接金属で破断し、破面に融合不良および多量の気孔が存在しているにもかかわらず、継手強度がかなり大きい試験片が認められた。スタッド軸部で破断した試験片の溶接部には内部欠陥の存在が想定されたので、溶接部に放射線透過試験を実施した。Fig.7(a), (b)にフィルム上で確認された溶接部の融合不良および気孔発生例を示す。

スタッド軸部に発生した融合不良の面積をFig.8上図に示し、確認された気孔の面積の合計を気孔面積としてFig.8下図に示す。図中の記号はFig.4と同様の測定値および平均値である。電流値1.5kAの場合、融合不良はアーク時間の短い範囲と長い範囲で認められ、1.2~1.7sの範囲では融合不良は少ない。電流値2.1および2.6kAの場合、それぞれアーク時間0.8および0.5sまでは融合不良は認められないが、それよりアーク時間が増加すると、融合不良面積が増大する。アーク時間が長い範囲で発生する融合不良については溶接電流値の増加に伴って融合不良の発生時期が短時間側に移行しており、この範囲の融合不良発生の主要

Fig.7 Examples of X-ray photography of the welds including (a) lack of fusion and (b) blowhole

Fig. 8 Influence of welding parameters on lack of fusion and blowhole

Fig. 9 Relationship between defect ratio and joint strength

因は過多の熱量による溶融金属の脱落、および前述した短絡によるスタッドを押し込む量の不足が考えられる。一方、電流値 1.5kA でアーク時間が短い範囲で発生する融合不良は溶接部に供給される熱量の不足が主要因と考えられる。この条件範囲は Fig. 4 に示したように押し込み距離が小さい範囲と一致している。融合不良の発生機構については、さらなる検討が必要であろう。

いずれの電流値の場合でも気孔はアーク時間の短い範囲では発生が少なく、特に 2.1 および 2.6kA でアーク時間がそれぞれ 0.8 および 0.5s 以下の範囲では気孔がほとんど観察されない。アーク時間が長くなると気孔の発生が顕著になる。しかしアーク時間がさらに長くなると、いずれの電流値においても気孔面積が減少する。この気孔面積の減少の理由は次のように考えられる。Fig. 8 下図に示した気孔面積は直径 19mm のスタッド軸部の断面の範囲で観察された気孔の面積であり、カラー部に発生している気孔を除外している。またアーク時間の長い範囲では融合不良面積がスタッド軸部断面面積の相当部分を占めており、融合不良部では気孔が溶融金属外へ放出されやすいため気孔として残留しない。これらの理由によって観察される気孔面積が減少

しているため、アーク時間が長すぎる場合にも気孔発生の可能性は高いと考えねばならない。

継手強度に及ぼす欠陥度の影響を Fig. 9 に示す。欠陥度はスタッド軸断面面積に対する融合不良の面積と気孔面積を合計した値の百分率とした。図中の白抜き記号はスタッドの原質部における破断であることを示し、中塗りの記号は溶接部での破断であることを示す。また○、△および□印は Fig. 4 で述べたカラーの形成角度の程度で分類している。欠陥度が小さい範囲を図示するために横軸は対数尺とした。欠陥が検出されなかった試験片については図の左端の軸上に示した。

JIS B 1198 が規定する鋼スタッドの引張強さの最小値は 400 N/mm²、最大値は 550 N/mm² で、この値を直径 19mm のスタッド軸部の公称断面面積に乗じると引張荷重の最小値は 113kN となる。継手強度はスタッド原質部で破断した場合には JIS が定めるスタッドの引張荷重の最小値（図中の実線）を十分に満足している。本研究の範囲においては欠陥度が 10% までは強度の低下が全く認められない。欠陥度が 20% を超えると、溶接部で破断するが増加し、継手強度が大きく低下する場合がある。

アーク時間を 1.0s にして各電流値で実験した試験片のビッカース硬さ (200g - 30s) の例を Fig. 10 に示す。溶接金属の厚さは溶接条件によって異なるので、母材側ボンド部とスタッド側ボンド部の位置（図中に縦線で示す溶接ボンド部 I、II）とがそれぞれ 0 と 1 になるように測定点の位置を換算して表記した。スタッド原質部の硬さが HV150 程度であるのに対して溶接金属の硬さは HV225 ~ 300 程度である。HV 硬さで 75 ~ 150 程度の差があるので、溶接金属および熱影響部の強度はスタッド原質部の強度より増加していると考えられる。

本実験の範囲では、欠陥度が 10% 以下の継手は、静的な引張強度に関して実用上問題のない強度水準を保っている。一方、カラー角度と継手強度には相関関係がほとんど認め

Fig. 10 Hardness distribution of stud welds

られない。カラー角度が270～360度であっても(○印)、欠陥度が80%を超える場合があり、この継手では外観上は完成しているが、継手内部はほとんど接合されていない。一方、カラー角度が180度以下の場合であっても(□印)、欠陥の発生が少なければ十分に規格を満足している。

5. 横向大径スタッド溶接の適正条件について

本実験では、Fig.4に示したようにスタッドの全周に十分なカラーを形成する溶接条件の範囲は見出せなかった。また、Fig.9に示したように、カラー角度と継手強度との間には相関がないことが明らかになった。すなわち、カラーの形成が不十分であっても十分な強度を持つ継手が存在し、またカラーが形成されても内部に欠陥を有する継手も存在している。カラー形成がスタッド継手の健全性を表しているとする評価基準は見直されるべきである。

スタッド継手には溶接条件によって融合不良および気孔が認められる。これらの溶接欠陥は静的な継手強度を低下させるが、溶接金属の単位面積当たりの強度がスタッド原質部より大きいために、欠陥度が10数%まではスタッド原質部で破断する。しかし、十分な継手強度を有するとしても溶接部は欠陥がないことがより望ましい。このような観点から、溶接電流および主アーク時間を主たる溶接条件として、適正な溶接条件範囲を考える。

Fig.11に本実験結果をまとめて示す。図中の○印および◇印はそれぞれ、継手強度が頭付きスタッドのJIS規格を満たす113kN以上であることおよび113kN未満であることを示し、中塗りの印は引張試験において溶接部で破断したことを、白抜きの印はスタッド原質部で破断したことを示す。曲線AA'より大電流-長アーク時間側および曲線CC'より小電流-短アーク時間側では融合不良が発生する。また曲線BB'より大電流-長アーク時間側では気孔の発生が著しい(Fig.8)。Fig.11より明らかなように、十分な強度を有し、溶接欠陥のない継手の溶接条件は、大電流-短アーク時間の範囲にあることがわかる。

国内で鋼スタッドを製造・供給している主要な企業では直径19mmの頭付き鋼スタッドを下向溶接する場合の溶接条件として1.5kA, 1.0sを推奨している。この溶接条件をFig.11中に*印の付いた○印で示す。横向溶接では小電流-

Fig. 11 Suitable range of arc time and welding current for getting sound weld

短アーク時間のために融合不良が発生する条件範囲にある。本研究で明らかにした横向溶接の適性条件である大電流-短アーク時間の範囲とは重ならない。

6. 結 言

下向溶接用として用いられている直径19mmの頭付き鋼スタッドおよびフェルールを用い、溶接姿勢を横向にして溶接欠陥の発生に及ぼす溶接条件の影響を検討し、以下の結論を得た。

- (1) フェールの空隙部を満たす十分なカラーを形成できる溶接条件は見いだせなかった。
- (2) カラーの形成と継手強度との間には相関がない。
- (3) 溶接部の融合不良は大電流-長アーク時間および小電流-短アーク時間の範囲で発生する。前者は溶融量過多による溶融金属の垂れ落ちが原因であり、後者は溶融不足に起因するものと考えられる。
- (4) アーク時間が長くなると溶接部に多数の気孔が発生する。溶接電流の増加に伴って最初の気孔発生までの時間は早くなる。
- (5) 以上の結果を総合的にまとめると、鋼大径スタッドの横向溶接において溶接欠陥の発生を抑制できる条件は大電流-短アーク時間の範囲に存在すると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 日本道路協会 2012.2.
- 2) Kousuke TUJI, Masaki SHIMAMOTO and Kazuo TATEISHI: A study on the quality of studs welded in horizontal position and the possibility of post-welding repair; 鋼構造論文集 9-35 (2002) 17-24
- 3) 一般社団法人スタッド協会：スタッド溶接技術検定テキスト スタッド溶接