コンデンサ式点溶接結果の統計的解析 (第 2 報)*

山 口 武 勇** 佐 藤 次 彦**

A Statistical Analysis on Spot Welds Using Capacitor
Discharge Resistance Welding Machine (2nd Report)*

by Takeo Yamaguchi** and Tsugihiko Satoh**

Monitoring elements during welding for mild steel and aluminium alloy in spot welding are proposed, which can utilize in evaluating the tensile shear strength of the spot welds and the nugget dimension, by employing the same statistical analysis as 1st report. Monitoring elements selected are electrode movement, voltage between electrodes and voltage between sheets.

The results obtained are as follows:

- (1) For the mild steel, the peak value of voltage between electrodes can be used properly as the element of monitor under the suitable welding conditions.
- (2) For the aluminium alloy, the peak value of electrode movement can be used properly as the element of monitor under the suitable welding conditions.

1. は じ め に

われわれは、第 1 報¹⁾で薄板の軟鋼 SPCC-1 とアルミニウム合金 5052 のコンデンサ式点溶接において引張せん断強さなどの信頼性を保証するのに必要な溶接条件と試験片の個数についてまず検討した。ついで引張せん断強さとナゲット形状とが実験要素および判定要素 (第 1 報 Table 1 参照) とどのような相関をもつかを調べるため上記の検討によって求められた試験片の個数を満足する個数 (それぞれ 50 個) について実験を行なった。この実験結果をもとにして中切りが発生せずかつバラツキの少ない溶接結果がえられる溶接条件の適当な範囲での通電前の板一板間および電極一板間の接触抵抗と引張せん断強さおよびナゲット形状との間の相関性について偏相関分析による統計解析を行ない、その結果いずれの接触抵抗も引張せん断強さおよびナゲット形状との相関は有意性を持たないことを明らかにした。

本報では、第 1 報と同じ統計解析によって非破壊的に溶接結果を評価するための検出因子と評価の方法について、すなわちどの測定要素が溶接結果のモニタとして使用できるかについて解析した結果について述べる。なお普通の点溶接についてのモニタの研究はかなり行なわれているが²⁾、コンデンサ式点溶接法についてのモニタリングの研究は見あたらない。なおこのモニタリングにつ

いての統計解析による評価方法はコンデンサ式点溶接法に限らず他の抵抗溶接法についても応用できるものと考えられる。

なお、点溶接部のモニタリングとしては二つの形が考えられる。その一つは、例えば電流値があるレベル以下になんらかの原因で降下したときその溶接部が不良であることを指示するような形のモニタで普通の点溶接の作業現場での電流監視装置として一部ではすでに実用化されている。もう一つの形のモニタは 1 回、1 回の溶接結果がどの程度であるかを溶接条件の連続した変動範囲で知るためのものである。われわれの対象としたモニタは後者に属するものであるが、もともとコンデンサ式点溶接法は普通の点溶接法にくらべて電流などの外的変動要因が小さいことが特徴であるので、モニタの有効性に対する判断は溶接条件設定位置のまわりの意識的でない変動の範囲においた。

2. モニタとしての諸測定要素について

ある適当な条件で被溶接材を溶接したとき、溶接部には温度上昇、ひいては熱膨脹、溶融などの現象が起こる。この熱膨脹、溶融は被溶接材の塑性変形にうちかって電極可動部を押し上げる、いわゆる電極運動をひき起こす。また温度上昇によって溶接部の固有抵抗が変化し、その結果、電極間や板一板間に電圧変化を生じる。したがってこれらの量は溶接部のナゲット形成の状態をある程度表わすことが期待される。われわれは電極運

*原稿受付 昭和50年1月13日(昭和49年度秋季全国大会にて発表)

**正 員 大阪工業大学 Member, Osaka Institute of Technology.

動, 電極間電圧, 板一板間電圧などの測定要素の値を先に述べた実験において実験ごとに実験要素, 判定要素に対し1:1の対応で記録し, その結果について統計解析を行なうことによってどの測定要素がモニタとして有効かを判断することを試みた. なおこれらのそれぞれの測定要素の変化曲線のどの部分を取り出せばよいかについてはいろいろの方法²⁾が考えられるが, われわれはそれぞれの曲線のピーク値を採用した (第1報 Fig.2参照). 電極間電圧 V_e のピーク値は電圧波形を電流波形で割って求められる抵抗のピーク値と一致しないが, 同一材質の試験片では電極間電圧のピーク値に達する時期がどの試験片についてもほぼ一定であること, また電極間電圧がピークとなる時間は抵抗の飽和する時間とかなり近いことおよび測定の手間から抵抗のピーク値の代りに電極間電圧のピーク値を探ることにした.

なお, ナゲット形状と引張せん断強さとは1:1の対応で実験的に求めることは不可能であるが, 測定要素と引張せん断強さおよび測定要素とナゲット形状との相関をそれぞれ調べることによって, 引張せん断強さとナゲット形状の相関についての知識をうることも期待できる.

3. 電極運動, 電極間電圧, 板一板間電圧などの測定要素についての実験結果

第1報で述べた統計解析のための実験と同時に行った測定要素としての電極変位, 電極間電圧, 板一板間電圧などのピーク値の平均値の電流値の変化に対する値を Fig. 1~4 に示す. これらのデータは引張せん断強さとの相関を求めるため行なった50個の実験のものであり, 引張せん断強さの平均値もあわせてプロットしてある. Fig. 1, 2 は軟鋼, Fig. 3, 4 はアルミニウム合金についてのものである. ここで $\bar{F}_s$ は引張せん断強さ, $\bar{D}$ は電極運動, $\bar{V}_e$ は電極間電圧, $\bar{V}_c$ は板一板間

電圧のそれぞれの平均値である.

つぎにナゲット形状との相関を求めるための50個の実験においてえられた $\bar{D}$, $\bar{V}_e$, $\bar{V}_c$ などの値をナゲット径の平均値 $\bar{d}_n$, ナゲットの溶込み深さの平均値 $\bar{h}_n$ とともに示す. Fig. 1~4 の $\bar{D}$, $\bar{V}_e$, $\bar{V}_c$ と Fig. 5~8 のそれとを比較したときかなりよく一致している. これは実験の再現性の保証とともに統計解析の基礎となる仮定がかなり満足されていることをも示すものである (ナゲットが形成されない部分があること, その他の理由でデータが一部欠除している).

Fig. 2 Relationships of $\bar{F}_s$, $\bar{D}$, $\bar{V}_e$ and $\bar{V}_c$ with I_m

Fig. 3 Relationships of $\bar{F}_s$, $\bar{D}$, $\bar{V}_e$ and $\bar{V}_c$ with I_m

Fig. 1 Relationships of $\bar{F}_s$, $\bar{D}$, $\bar{V}_e$ and $\bar{V}_c$ with I_m

Fig. 4 Relationships of $\bar{F}_s$, $\bar{D}$, $\bar{V}_e$ and $\bar{V}_c$ with I_m

Fig. 5 Relationships of $\bar{d}_n$, $\bar{h}_n$, $\bar{D}$, $\bar{V}_e$ and $\bar{V}_c$ with I_m Fig. 6 Relationships of $\bar{d}_n$, $\bar{h}_n$, $\bar{D}$, $\bar{V}_e$ and $\bar{V}_c$ with I_m Fig. 7 Relationships of $\bar{d}_n$, $\bar{h}_n$, $\bar{D}$, $\bar{V}_e$ and $\bar{V}_c$ with I_m

これらの実験結果でとくに注目すべき点は、電流値の変化に対する電極間電圧の変化量にくらべて板一板間電圧の変化量が非常に小さいこと、板厚が小さい場合電極運動の変化が小さいことなどである。

さて第1報でも述べたように中チリが発生すると一般に十字引張り強さが低下するなど好ましくない傾向があることが知られている。したがって安全性を考えれば、

Fig. 8 Relationships of $\bar{d}_n$, $\bar{h}_n$, $\bar{D}$, $\bar{V}_e$ and $\bar{V}_c$ with I_m

中チリ発生開始点よりもかなり低い電流値のものが実用の溶接条件として適当であろう。われわれはモニタとしての主点において判断する溶接条件を、チリ発生開始点とともに $\bar{P}_s$, P_s の変動率 (第1報参照), $\bar{d}_n$, $\bar{D}$ などの傾向も考慮して軟鋼で板厚 0.8 mm, 加圧力 300 kg の場合には電流値 15 kA 付近に、板厚 0.6 mm, 加圧力 200 kg の場合には 13 kA 付近に、アルミニウム合金 5052 板厚 0.8 mm, 加圧力 200 kg の場合には電流値 22 kA 付近に、板厚 0.6 mm, 加圧力 200 kg の場合には電流値 20 kA 付近におくことが適当であると考え

4. 引張せん断強さおよびナゲット形状に対する電極運動、電極間および板一板間電圧の偏相関分析結果

上記の実験結果をもとにして測定諸要素と引張せん断強さおよびナゲット形状との関連を偏相関分析によって求めた結果を軟鋼の場合とアルミニウム合金の場合に分けて述べる。なおここで使用した偏相関分析方法は第1報6節と全く同様である。

4.1 軟鋼の場合について

軟鋼の場合について偏相関係数を計算した結果をFig. 9~14に示す。なおこれからの議論ではすべて偏相関が有意性を持つ限界の絶対値は図中の ρ_0 で、その値は $\rho_0=0.29$ である。Fig. 9, 12 をあとで述べるアルミニウム合金の場合の対応する Fig. 15, 18 と比較するとき、アルミニウム合金の場合のように電流値の広い範囲にわたって有意性をもつ測定要素は認められない。しかしながら3節で述べた適当な溶接条件付近、すなわちFig. 9では15 kA 付近では電極間電圧 V_e が、またFig. 12でも13 kA 付近で電極間電圧 V_e が有意性をもっている。電極運動 D については板厚の厚い 0.8 mm のもので有意性を示す部分があるが、適当な溶接条件付近ではない。なお板一板間電圧 V_c と引張せん断

Fig. 9 Partial correlations of P_s with D , V_e and V_c . Fig. 10 Partial correlations of h_n with D , V_e and V_c . Fig. 11 Partial correlations of d_n with D , V_e and V_c . Fig. 12 Partial correlations of P_s with D , V_e and V_c .

強さについては、板厚 0.8, 0.6 mm とも有意性が認められていない。このことは板一板間電圧 V_e が板と板との接触面付近の電圧変化を主として検出しているため溶接部に生じたナゲットの形状に対して有意性のある相関をもたないものと考えられる。したがってモニタとしては不適当な量である。

つぎに、ナゲット形状と測定諸要素との中の偏相関について述べる。なおナゲット直径を d_n 、ナゲットの溶込み深さを h_n で表わす。Fig. 10, 11 は板厚が 0.8 mm の場合のものであるが、適当な溶接条件である電流値 15 kA 付近では電極間電圧 V_e が溶込み深さ h_n に対して有意性をもっており、電極間電圧 V_e がこの付近で引張せん断強さに対して有意性をもったことのうらづけを与えている。なお h_n が電極運動 D に対して有意性をもつ相関を示している。つぎに板厚 0.6 mm のものについて Fig. 13, 14 に示す。この場合電極間電圧 V_e はナゲット直径 d_n に対しては有意性をもたないが溶込み深さ h_n は適当な溶接条件 13 kA 付近で有意性をもっている。このことと前述の Fig. 12 の説明とあわせて考えると、ナゲットの溶込み深さの大きさが引張せん断強さの大きさに関係していることが類推される。なおあとで述べるようにアルミニウム合金の場合にはこの傾向はもっと顕著である。

Fig. 13 Partial correlations of d_n with D , V_e and V_c . Fig. 14 Partial correlations of h_n with D , V_e and V_c .

以上の結果から測定諸量のピーク値で判断する限り軟鋼の場合、溶接部の引張せん断強さに対して板厚に関係なく適当な溶接条件付近で相関の有意性が認められる測定要素は電極間電圧であり、この量がモニタとして適当であるといえる。しかしアルミニウム合金の場合ほどはっきりした結果ではなかった。なお同じ溶接条件付近で電極間電圧は溶込み深さに対して有意性のある相関をもっており、引張せん断強さの大きさが溶込み深さの大きさと関連していることを暗示している。

4.2 アルミニウム合金の場合について

Fig. 15~20 はアルミニウム合金 5052 で板厚が 0.8,

Fig. 15 Partial correlations of P_s with D , V_e and V_c

Fig. 16 Partial correlations of d_n with D , V_e and V_c

Fig. 17 Partial correlations of h_n with D , V_e and V_c

0.6 mm の場合について解析した結果である。まず Fig. 15, 18 から板厚に関係なく適当な溶接条件付近はもちろん広い電流範囲にわたって電極運動 D が引張せん断強さに対して大きな有意性をもっていることがわかる。板一板間電圧 V_e は全く有意性をもたず、電極間電圧 V_c も板厚 0.8 mm, 電流値 21.5 kA 付近で有意性をもつだけである。つぎにナゲット径とナゲット溶込み深さについて述べる。板厚 0.8 mm の場合 (Fig. 16, 17), d_n はどの測定要素に対しても全く有意性をもたないが, h_n は適当な溶接条件付近にわたって電極運動 D との有意性を示している。このことは軟鋼の場合と同様溶込み深さの大きさが引張せん断強さに関係していることを暗示するものである。板厚 0.6 mm の場合 (Fig. 19,

Fig. 18 Partial correlations of P_s with D , V_e and V_c

Fig. 19 Partial correlations of d_n with D , V_e and V_c

Fig. 20 Partial correlations of h_n with D , V_e and V_c

20) も板厚 0.8 mm の場合と全く同様の傾向を示している。

以上のことから, 測定諸量のピーク値で判断する限り, アルミニウム合金5052に対する溶接部の引張せん断強さを評価する目的のモニタとしては, 電極運動 D を利用することが適当であるといえる。さらにアルミニウム合金5052の場合には電極運動 D が h_n と有意性のある相関をもっており, 軟鋼の場合と同様 h_n の大きさが引張せん断強さと関連していることを暗示している。

h_n が大きいほど引張せん断強さが大きくなる理由の説明はかなりむずかしいが, ナゲット部の伸びが母材の伸びと異なることを仮定すれば, ナゲット周辺の応力負担部の面積は h_n が大きいほど大きいことから一応の説明はできそうである。しかしこの説明について確認はまだ不十分なので, ここでは統計解析の結果 h_n が引張せん断強さに有意性のある相関をもつという結論がえられたという結果の提示だけにとどめることにする。

5. 偏相関分析結果の検討

上記の偏相関分析によれば, 軟鋼とアルミニウム合金5052の場合にそれぞれモニタとして適当な測定要素が異なっていた。すなわち, 軟鋼の場合には電極間電圧 V_e が板厚に関係なくモニタとして適当であり, さらに電極間電圧 V_e が溶込み深さ h_n に有意性のある相関をもっていた。一方アルミニウム合金の場合には板厚に関係なく電極運動 D がモニタとして適当であり, さらに電極運動 D がナゲットの溶込み深さ h_n に有意性のある相関をもっていた。そこでつぎにこの相異がある理由などについて考えてみよう。

軟鋼の場合は電気固有抵抗およびその温度係数がアルミニウム合金にくらべて大きく, それらの値は前者では約3倍で後者では約1.7倍であり, また融点も2倍以上であるから, ナゲットの形成時期における温度上昇部の抵抗変化は大きく, その結果, 電極間電圧が大きくなり引張せん断強さに対するモニタとして適当な量となると

ともに, ナゲット形成状態を表わす要素の一つである溶込み深さに有意性のある相関を示したものと考えられる。またアルミニウム合金の場合電極運動がモニタとして適当であったのは, アルミニウム合金の熱膨脹係数が軟鋼のそれに比較して約2倍大きく, さらに溶融状態での相変化による膨脹が大きいために, 電極運動が大きくなり引張せん断強さに対するモニタとして適当な量となるとともに, ナゲット形成状態を表わす要素の一つであるナゲットの溶込み深さに有意性のある相関を示したものと考えられる。

6. おわりに

以上コンデンサ式点溶接法における溶接結果のモニタリングについて, どの測定量が引張せん断強さおよびナゲット形状を評価するのにもっとも適当なものであるか, すなわちモニタとして適当であるかを統計解析に必要な個数の実験をもとにした偏相関分析によって検討した。その結果測定諸量のピーク値で判断する限り, 適当な溶接条件付近では, 軟鋼の場合には電極間電圧が, またアルミニウム合金5052の場合には電極運動がそれぞれ引張せん断強さに対するモニタとして利用できる適当な量であることを示した。ただし軟鋼の場合はアルミニウム合金の場合ほどはっきりした結果はえられなかった。またこれらの解析からナゲットの溶込み深さがモニタとして利用できる量と有意性のある相関をもつことから, ナゲットの溶込み深さが引張せん断強さと関連していることが推論された。

なお溶接機の貸与などの便宜をはかって下さった松下電気産業株式会社溶接機事業部土江事業部長に対して深く感謝する。

参考文献

- 1) 山口, 佐藤: コンデンサ式点溶接結果の統計的解析 (第1報), 本誌, 44-7 (1975), 387
- 2) 中村: 点溶接における品質保証とモニタリングの現状と問題点, 抵抗溶接研究委員会資料, RW-2-73