点溶接におけるナゲット生成機構に関する研究 (第 2 報)*

—ナゲットの組織と強さとの関係—

中 村 孝** 浜 崎 正 信**

Some Studies of Nugget Formation Phenomena
on Spot Welding (Report 2)*

—Relation between Nugget Structure and Weld Strength—

by Takashi Nakamura** and Masanobu Hamasaki**

Abstract

In spot welding, tensile shear strength will increase exponentially as time goes on in the condition that weld time is set longer and will eventually saturate.

However, tensile strength reaches a maximum point at a certain weld time and it goes down abruptly after that time. Seeing that tensile shear strength increases as weld time goes on, we may consider that corona bond increases little by little, but the nugget itself will never grow.

Corona bond increases tensile shear strength, but not tensile strength.

As we reported in First Report, columnar structure (substructureless) is generated from the external boundary of nugget if weld time is set longer and the boundary becomes brittle and accordingly tensile strength goes down.

1. は し が き

点溶接において、ある通電（ウエルド）時間内で溶接すれば、ナゲットの組織はセルまたはセル・デンドライトになるが、ウエルド時間が長くなると、ナゲットの外周部はサブストラクチャーを含まない柱状晶のみを生じ、ナゲットの内部のみがセルまたはセル・デンドライト組織になる。さらに長くなるにつれて、この柱状晶の

みの生ずる範囲は内部に広がり、ついにはナゲット全体が柱状晶のみになる。このような組織の時間的变化については、1.0 mm の板厚の軟鋼を例にし、第 1 報において通電中にナゲット内に生ずるリング模様についてと題して説明したが、第 2 報ではこのような柱状晶のみの発達がナゲットの強さにおよぼす影響について報告する*。

2. 実験装置および材料

実験装置は Fig. 1 のように第 1 報において報告したものと同様であるが、点溶接にさいし、溶接部の抵抗変化による電流の変動をなくするために、2 次回路のインピーダンスを 1000 $\mu\Omega$ と高くした点が異なるだけである。

実験に使用した材料は第 1 報のときと同じように 1.0 mm 板厚の磨き軟鋼板である。

3. 実験結果

3.1 普通の溶接条件の場合

RWMA (米国抵抗溶接機製造者協会) A, B, C の各ク

結晶の用語については長くなる表現はさけているので誤解を生じやすい。が文献 7 を参考とされたい。

Fig. 1 Spot welder for experiment

*原稿受付 昭和42年10月5日

**正 員 電元社製作所 Member, Dengensha Mfg. Co., Ltd

Fig. 2 Testing method

Fig. 3 Relation between weld time and weld strength (welding condition: current 9200A, electrode force 240 kg)

ラスの条件には近い値として、電流、加圧力をそれぞれ (9200 A, 240 kg), (7800 A, 170kg) (5800A, 80 kg) で溶接し、Fig. 2 (a) のような引張せん断試験、同じく (b) のような十字形の引張試験を行なった結果を示すと、Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 のようになる。

引張せん断強さは20サイクルくらいまでは、ウェルド時間とともに増大しているが、それ以上長くしてもわずかに増加するだけである。30~50サイクルにもなれば、ほぼ飽和して一定になり、増大するどころか 場合にはよっては少し低下する傾向さえある。

Fig. 4 Relation between weld time and weld strength (welding condition: current 7800A, electrode force 170 kg)

Fig. 5 Relation between weld time and weld strength (welding condition: current 5800A, electrode force 80 kg)

一般には 電流, 加圧力を一定にしておき, ウェルド時間の長くした場合, 引張せん断強さは ある時間までは時間とともに増大するが, それ以上は飽和し, 強さが増加しないことはよく知られている⁵⁾。

このようになるのは, 第 1 報においてすでに報告したように, 1.0 mm の板厚の軟鋼では 普通の条件ではナゲットの大きさは 12~13 サイクルではほぼ飽和し, この状態がしばらく続いた後 17~20 サイクルを過ぎると, ナゲットは電流を流しているにもかかわらず 外周部から凝固し始める。しかしながら, 20 サイクル以上でも強さがいくらか増大しているのは, 電流によって発生した熱が板の周囲方向に逃げ 熱影響は増大し, コロナ・ボンド部が増加するためである。この部分は高温で しかも加熱時間が長くなるため, 拡散溶接 (圧着) され, これが強さの増大に寄与する。

Fig. 6 は各条件で点溶接し, Fig. 2 (b) のように十字形の引張試験をしたものの代表的な破断部のナゲットを示したものである。同じ溶接条件に対しては, 引張せん断試験ではウェルド時間にかかわらず ほとんどがティア破断する場合でも, 引張試験では ほぼ 10 サイクルまではティア破断するが (ティア破断したものは図中に $\times$ の記号を入れている。ここでは引張試験でナゲットで破断するものを便宜上テンション破断といふ, ナゲットの周囲で板が抜けるのをティア破断ということにする。) 10

サイクル以上になると, ほとんどテンション破断になっている。

Fig. 7 Relation between [weld time and nugget diameter, corona bond diameter welding condition: standard electrode force)

Fig. 6 Relation between welding condition and fracture appearance

Fig. 7 はほぼ A, B, C に近い各クラスの条件で点溶接したものを 十字形引張試験し, そのナゲットの破断部におけるナゲットの直径 (d) とコロナ・ボンドの直径 (D) およびこれらの面積比 ($d^2/D^2 = (a/A)$) の時間的変化を示したものである。A, と B, の条件では 10 サイ

ルまでは 5 本の試験片全部がティア破断するため, (A) (a) が区別できず, 10 サイクル以下のときは示していない。C 条件の場合 大部分は Fig. 6 に示すようにティア破断するが, 中にはテンション破断するものもある。このテンション破断するもののコロナ・ボンド径 (D), ナ

ゲット径 (d), 面積比 (a/A), を測定計算したものである。したがって 10サイクルまでの各条件のものは平均値ではなく, 比較的溶接結果の悪いものが示されたことになる。

A, B, C, 各条件とも ほぼ同じような傾向を示しており, a/A は10~12サイクルで最も大きくなっている。その後は各条件とも時間とともに小さくなる。

さて, ここで大いに注目すべきは十字形の引張試験結果である。この十字形試験では 治具の適否によってかなり試験結果にバラツキをあたえるので, 試験治具の取扱いは充分注意を払っているし, 試験片も溶接用治具に挿入して溶接位置をきめ, できる限り 治具の取扱不良による強さのバラツキがおこらないようにしている。

引張せん断強さは ウェルド時間とともに増大し, ある時間になればほぼ飽和し, その値は一定となるのに対し, 引張強さは 各条件とも, この引張せん断強さの飽和する時間より はるかに短い時間である10サイクルまでは時間とともに増大し, 10サイクルを過ぎると急激にその強さは低下し, バラツキも大きくなる傾向がある。したがって延性比も一般には10サイクルまではゆるやかに大きくなり, 10サイクルで最高になり, それ以後 急激に低くなっている。

普通 1.0 mm の板厚の軟鋼の溶接の場合 延性比は 30~40%と考えられ, 高くても50~60%であり, それ以上高い値のものは 散りをおびだしく発生している場合が多いが, 適正条件であれば 何ら散りを発生することなく70~90%と非常に高い値の得られることがわかる。

これらの点から考えて, 板厚 1.0 mm では時間10サイクルがもっともよく, 強さが要求されるときは時間はこのままで電流, 加圧力を増すのがよい。いたずらに時間を長くすることは, 引張強さの低下を招くので好ましくないといえる。

3.2 普通の溶接条件より加圧力が高い場合

3.1項に述べた A, B, C にほぼ近い条件は, 電流に対する加圧力は散り限界曲線上の値が採用されている。この限界曲線より加圧力のかかなり高い例として, 9200A, 450 kg の条件で点溶接したものについて, 引張せん断強さ, および引張強さ, 延性比を示すと Fig. 8 に示すようになり, Fig. 3 と比較してもわかるように, 引張せん断値は 800 kg から 650 kg と80%くらいに低下しているが, 引張強さは 10サイクルの所を仮りに比較しても, 600 kg が 250 kg にも いちじるしく低下し40%になっている。このようになるのは Fig. 6 のナゲットの破断状態, また Fig. 9 のナゲットの直径 (d) とかコロナボンドの直径 (D) をみてもわかるように, 9200A 240 kg と加圧力の低い場合と比べ, コロナ・ボンド径

Fig. 8 Relation between weld time and weld strength (welding condition: current 9200A, electrode force 450 kg)

(D) はあまり変らないが, ナゲット径 (d) は小さくなっているためである。コロナ・ボンドのように たんに圧着されただけの所は引張やせん断強さはあまり低下しなくても引張強さはいちじるしく低下する。

Fig. 9 Relation between weld time and nugget diameter, corona bond (welding condition: high electrode force)

4. 実験結果に対する考察

以上のようにウェルド時間が長くなるにつれて、引張せん断値はいくらか増大するのに対し、引張強さが大きく低下する原因については次のように考えられている。

- (1) 溶接部の残留応力
- (2) 熱影響による軟化
- (3) ナゲットの柱状晶のみの発達

まず (1) の残留応力については、軟鋼 1.0 mm の点溶接についてのデータはないので、他のデータより類推するしかないが、残留応力は熱影響よりナゲットの内部の方が大きいので、ナゲットの外周部とか、熱影響部で大きな力を受ける引張試験では、その影響は少ないと考えられる。^{2), 3), 4)}

また、我々は残留応力を除去するために、ナゲットの外周部、内部、などいろいろの場所を 20~40 kg/mm² の圧力で加圧してみたが、その結果はあまり変化なかった。しかし この方法では残留応力が除去できたという証拠はないので、残留応力は影響しないという結論は出せない。

一般論としては ウェルド時間の長いものを短いものを比較すると、ナゲットの大きさが同じときは、短い方が急冷されるために熱応力を発生しやすい。しかるに時間の長いものの方が強さが低下している。これらの点よりみて、残留応力はあまり引張強さには関係がないのではないかと考えられる。

(2) の熱影響部については、ウェルド時間が長くなれば熱影響部は当然広がる。しかも この部分は軟化するので強さは低下する傾向が強い。しかし この軟化部の存在のために強さが低下するならば、引張試験のとき熱影響部が伸びるため、Fig. 10 付図のように試験片の曲る角度 θ は大きくなるにもかかわらず強さは低下しなければならない。しかし 実測の結果は Fig. 10 より

Fig. 10 Comparison between short weld time and long weld time for bending angle

明らかなように、ウェルド時間が長くなり 軟化部が広くなっているが、曲げ角度 θ は小さくなっている。換言すれば 非常に脆くなって破断している。この傾向は A, B, C, の条件にかかわらず同じであり、曲げ角度 θ は 10 サイクルを過ぎると急激に低下している。

また A 条件 9 サイクルで溶接したもの (a) と、50 サイクルのもの (c) を比較すると、Fig. 11 のように明らかに 50 サイクルの方が熱影響部が大きい。いま 9 サイクルで 1 度溶接したものを電流を下げ、加圧力を上げ、再通電によりナゲットを作らないように注意しながら通電加熱し、熱影響部のみ 50 サイクルで溶接したものと同じくらい広くした (b) を比較すると、(a) と (b) は強さ、曲げ角度とも ほぼ同じくらいであり、(c) のみがいちぢるしく低下している。この結果から熱影響部の変化によるものでないことがわかる。

以上の点から 原因として (3) が考えられる。前回第 1 報において、軟鋼 1.0 mm の点溶接では、普通の溶接条件によると、10~12 サイクルでナゲットの大きさは飽和し、17~20 サイクル以上になると、電流を流している

Fig. 11 Comparison of surface appearance of welds between weld time 9 cycles, weld time 50 cycles, and small current is again applied for heating, after welding weld time 9 cycles

にもかかわらず冷却し始め 柱状晶のみの生ずることについて説明した。Fig. 12 (a) は 9 サイクルで溶接したときのマクロ写真であり、(b) はそのコロナ・ボンド部のミクロ組織であるが、9 サイクルではリング模様はコロナ・ボンド部周辺には何ら出ていないし、十字形の引張試験でも母材で破断している。Fig. 13 は同じ条件で 12 サイクルで溶接したもの。(a) はマクロ組織 (b) (c) [(a) (b) は同一材であるが、(c) は同一条件による別の材料] は十字形の引張試験を行ない、最大荷重点を過ぎた所で荷重を除き、どこから破断が起きているかを調

Fig. 12 Macro and micro structure (welding condition: current 9200A, electrode force 240 kg, weld time 9~)

(a) $\times 20 \times 2/5$ (b) $\times 100 \times 2/5$ (c) $\times 100 \times 2/5$

Fig. 13 Macro and micro structure (welding condition: current 9200A electrode force 240 kg, weld time 12~)

べたものであるが、(b)(c)はいずれも柱晶の境界に沿って起こっている。コロナ・ボンドの所をみると、不明瞭ながら2~3本非常に狭い間隔でリング模様が出ている。ナゲットが冷却するとき、かならずしも均一に周囲から冷却するとは限らない、Fig. 13 では 切断した所では2~3本であるが、切断する場所によっては4~5本、あるいはそれ以上出ている可能性もある。1ヶ所このようにリング模様が多く出て柱状晶のみが発達すれば、まず シートセパレーションの所がノッチとなり、コロナ・ボンド、柱状晶とつぎつぎと脆化し、柱状晶の粒界に沿って、ナゲットの中央から破断するようになる。このとき、たとえシートセパレーションより破壊が進行しても、柱状晶のみの組織でなければ、ナゲットの所で止まり、その後はナゲットの外周に沿って破壊するようになり内部まで進行しない。9サイクルではこのような柱状晶のみにはならないが、それ以上になると、わずかながら出始め 引張強さは低下する。

Fig. 14 は A 条件でウエルド時間50サイクルのもの

Fig. 14 Micro structure of corona bond zone (weld time 50~)

であり、少し割れの入ったものであるが、柱状晶がよく発達しており、この境より割れているのがよく見られる。ピントを柱状晶に合わせているので、リング模様とかセラーとか、セラー・デンドライトはちよっと見にくいですが、ピントの合わせ方により、次の Fig. 15 (a) (b) のようによく見られる。Fig. 15 はナゲットの中央近くまで割れを進行させたものであるが、Fig. 14 と Fig. 15 とはテストピースは異なるが、溶接条件は同じである。) 初め柱状晶の境界から割れが入り、さらに進行してナゲットの中央中のデンドライトの所まで割れの入っているのがよくわかる。

5. 結 論

以上の実験結果から次の結論がえられる。

(1) 溶接結果の良否を判定するには、引張せん断試験より引張試験の方がよくわかる。

(2) 溶接部のコロナ・ボンドは引張せん断強さには寄与するが、引張強さにはほとんど寄与しない。

(3) 点溶接にさいし、ある時間以上通電時間が長くなると、柱状晶のみの組織が発達し 引張試験にさいしこの粒界から割れが入り、このノッチ効果のために引張強さは急激に低下する。

Fig. 15 Macro and micro structure (welding condition: current 9200A, electrode force 240 kg, weld time 50~)

軟鋼 1.0 mm を対象に考えると、10サイクルを過ぎると引張強さは低下する。この柱状晶のみの発達し始めたかどうかはリング模様の発生と密接な関係があり、第 1

報において報告したように、リング模様が出始めると引張せん断強さは低下しなくても、引張強さはいちじるしく低下する。

このような引張荷重に対しては、ウエルド（通電）時間が長いのは悪影響があるが、引張せん断荷重に対しては少なくとも時間が長い方が強さが増大するから、設計上純せん断荷重がかかるように設計される場合には、ウエルド時間に神経を尖らせる必要はないように考えられがちであるが、引張荷重に対しては弱くなる原因が柱状晶の発達による境界の割れにあることを考えると、そのノッチ効果のためたとえせん断荷重に対しても、疲れ強さが低下することが考えられ 引張荷重と同様にウエルド時間を長くしない配慮が必要であろう。

謝 辞

この研究を行なうにあたり、ご指導いただいた大阪大学工学部 安藤教授、西口教授、松田助教授、実験にさいし、終始熱心な協力を得た電元社 小保方君に深く感謝する次第である。

文 献

- 1) M.J. Holder, A.P.A. Demaid "Tension ratio as measure of spot weld ductility" W & MF March 1967.
- 2) W.Bolton "Residual stresses distribution in and around spot welds" B.W.J. February 1961.
- 3) G. Walter, A. Choquet. "Internal-stress distribution of single spot welds in relation to their fatigue life" W.J. April 1959.
- 4) J.F. Rudy "The behavior of spot welds under stress" W.J. February 1956.
- 5) 中村孝, 浜崎正信 散りの発生と溶接強さ JIW No. 3 No. 4
- 6) RWMA刊行 "Resistance welding manual"
- 7) 中村孝, 浜崎正信 「点溶接におけるナゲット生成機構の研究 第1報 通電中に生ずるリング模様」溶接学会誌1958 No. 1

会 費 の 請 求 に つ い て

本会では現在、昭和42年度下期分会費（42年9月から43年2月まで）を次のとおり請求しております。

年度末決算期が近くなりましたのでどうか早めにお納めくださるよう会員各位の御協力をお願いいたします。

また43年度上期分会費（43年3月から43年8月まで）を間もなく請求いたします。今年度から会告いたしました「会費請求及び滞納の処理に関する事務処理要領」を実施いたしますのでご承知おき下さるようお願いいたします。

正 員	1,200円
学 生 員	600円
団 体 員	1,200円
賛助員特級	26,000円
〃 1 級	19,000円
〃 2 級	15,000円
〃 3 級	12,000円

取引銀行 三和銀行岩本町支店 住友銀行神田駅前支店