

## 分割型探触子による中板スポット溶接部の探傷

石川 登  
藤盛紀明

## § 1. 結 言

スポット溶接は抵抗溶接法の一つであり、電極チップ間に被溶接部材を挿入し、その電極間に短時間大電流を流すことによって、板と板の接触面に抵抗熱が生じ溶融状態に達する。このとき、加圧されることによってナゲットが形成される。また、ナゲットの周囲の高温な不完全溶融部分が、加圧によって圧着状態となりコロナボンドが形成される。このスポット溶接は古くから多方面の分野で使用されており、現在でも車輻・自動車の外装鋼板や航空機のジュラミン鋼板などの薄板の溶接法として広く利用されている。近年そのスポット溶接を建築構造物（例えばアングルとパイプよりなるトラスの接点）にも使用しようとする動きがある。従来のスポット溶接が主として薄板を対象とし、多点によるものであり、また大きな負荷を受けない部分に使用されていたのに対し、建築構造物に使用されるスポット溶接は、特に強度を要求される継手部にも採用することが考えられている。その際、継手形状の関係から、またスポット溶接の性質（複数個のスポット溶接を行なうとき、溶接ピッチが小さいと無効分流を生じ正常な溶接部が得られない。へりあき・はしあきの確保が必要である。）から溶接点数が少なくなる。したがって、1溶接点が確実に所定の強度を持つことが要求される。現在建築学会ではスポット溶接の建築構造物への適用に備えて「工作基準」の作成が急がれており、中板・厚板のスポット溶接に対する管理方法の検討が行なわれている。

スポット溶接部の強度は、中板・厚板の場合には薄板の場合と異なり、そのほとんどをナゲット部のせん断強さに負っている。現在スポット溶接部のナゲットの大きさを管理する方法としては、電極チップ内に埋め込んだ超音波探触子により、ナゲット生成期における超音波ビームの応答性を調べ、それにより通電時間等溶接条件を変化させ、ナゲットを管理する方法が考えられている。また、アコースティックエミッション（A. E.）を利用

する管理方法としては、通電後一定時間経過してから、ある幅の時間ゲートに入る A. E. を計数し、その発生総数よりスポット溶接の強度を推定しようとする方法が考えられている。しかし、実際の施工管理の際には、形成されたスポット溶接部径を非破壊的に検査する必要がある。そこで、現在溶接部の非破壊検査に広く用いられている超音波探傷法により、ナゲット部およびその周囲に形成されるコロナボンド部の径の測定の可能性と、この種の溶接部において超音波探傷で見られる若干の特性を検討した。

## § 2. 実験方法

## 2.1 供試体

実験に供した鋼材の素成を表-1に示す。試験体はスポット溶接部における超音波探傷の反射エコーの特性を知るため、スポット溶接部に模して中央部に円柱状の突出部を持つ標準試験体と、実際にスポット溶接をほどこした溶接試験体を作製した。その形状・寸法の一例を図-1、図-2に示す。

標準試験体は、反射エコーにおよぼす溶接部の大きさと板厚の影響を知るため、板厚一定で突出部径の異なるものを4体、突出部径同一で板厚の異なるものを1体用意した。その突出部径、板厚寸法を表-2に示す。

溶接試験体は、板厚9mmと12mmのものを各4体用意した。なお、溶接試験体の表面には溶接時に生じる電極チップによる圧痕があり、この圧痕が探傷走査の障害となるため、圧痕を機械加工により取り去り探傷走査面を平滑にした。

C	Si	Mn	P	S
0.17	0.04	0.23	0.004	0.006

表-1 化学素成（単位：%）

## 2.2 使用機器

本実験にはクラウトクレイマ製 USIP-10W の超音波探傷器と、東京計器製 5Z10ND 分割型垂直探触子を特殊変換接栓で接続し使用した。

## 2.3 超音波探傷法による試験体の反射エコー測定

超音波探傷走査は、標準試験体・溶接試験体とも図-1、図-2に示す I, II 方向に中心より 1mm 間隔に 20mm の位置まで行なった。各測定点における底面反射エコー高さの測定は図-1、図-2に示す平滑面より  $t$  なる深さからの反射エコーを、探傷器ブラウン管の 50% の高さにしたときのアッテネイターの読み (dB) を記録した。

標準試験片では中央突出部、溶接試験片では溶接部が周辺部の板の底面からの反射エコー高さに影響をおよぼさなくなったときの、アッテネイターの読み (dB) を基準エコー高さとしてデータを整理した。

探傷走査は探触子の分割面と探触子走査方向が常に垂直となるように I, II 方向とも行なった。

## 2.4 ナゲット径, コロナボンド径の測定

溶接試験体は探傷試験後、図-2に示す I, II 方向に切断し、その切断面を研磨した後 5% ナイタルで腐蝕し、ナゲット径, コロナボンド径の測定を行なった。

試験体 No.	突出部径	板厚
S 1	35	12
S 2	30	12
S 3	25	12
S 4	20	12
S 5	30	9

表-2 標準試験体寸法 (単位: mm)

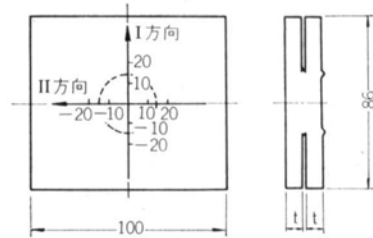


図-1 スポット溶接試験体の寸法・形状

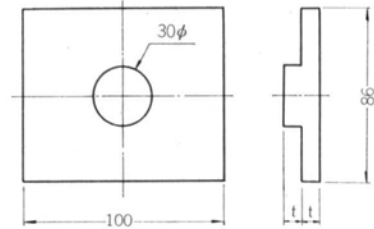


図-2 標準試験体の寸法・形状

## § 3. 実験結果

溶接試験体の形状および探触子位置と反射エコー高さの関係の一例を 図-3 に示す。反射エコー高さは、周辺部ではほぼ一定値 (基準感度) を示し、溶接部に近づくにつれてしだいに低くなり、溶接部内では急速に低くなり、ある点まで達すると消滅する。この反射エコー高さの変化は標準試験体に関しても同様な傾向が示された。

図-3 に示すように、反射エコー高さが基準エコー高さより低くなる範囲を反射エコーの減衰領域、エコーが消滅している領域を反射エコーの消滅領域 (以下  $l_a$ ,  $l_o$ ) と定める。なお、図-3 中の探触子位置 0 付近に見られる反射エコー感度の山は、ナゲット中に散在するブローホールによるものである。

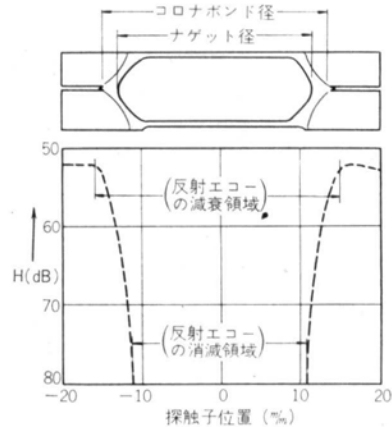


図-3 反射エコー高さの変化 (No. T-1-I)

つれて増大する。この  $l_a$ ,  $l_o$  の相加平均値  $(l_a + l_o)/2$  と  $D$  との間には強い直線関係が成り立つ。

### 3.1 標準試験体の反射エコー特性値 ( $l_a$ , $l_o$ ) と中央突出部径 ( $D$ ) との関係

板厚を 12mm と一定にし、 $D$  を 20mm~35mm に 4 段階に変化させた標準試験体の反射エコー特性値 ( $l_a$ ,  $l_o$ ) と  $D$  との関係を 図-4 に示す。 $l_a$ ,  $l_o$  は  $D$  が増大するに

### 3.2 標準試験体の反射エコー特性値と板厚との関係

$D$  を 30mm と一定とし、板厚を 12mm と 9mm に変化させた標準試験体の反射エコー特性値を比較すると、 $l_a$  は板厚が大きい 12mm の方が大きく、反対に  $l_o$  は板

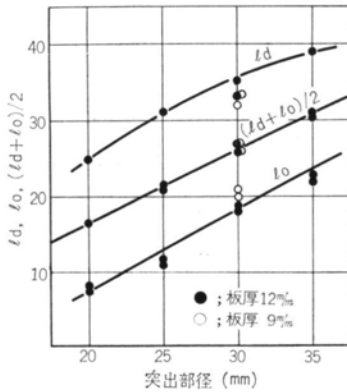


図-4 標準試験片突出部径と反射エコー特性値との関係  
厚の小さな9mmの方が大きくなっている。すなわち、板厚の大きなものは、小さなものに比較して中心から離れた位置で中央突出部の影響を受け、反射エコー感度の増大を必要とし、逆に中心部では周辺部の影響を受け、中心に近い位置まで反射エコーを受け取ることができる。これは、本実験に用いた分割型垂直探触子の鋼材内に伝播する超音波の広がり、その音圧分布の状態に起因するものと思われる。

3.1に準じて相加平均値  $(l_a+l_o)/2$  をとってみると、板厚に関係なく近似した値が得られた。(図-4参照) 筆者らは突出部径と相加平均値  $(l_a+l_o)/2$  との間にある相関関係があるものと考え、以下実際のスポット溶接物について検討を行なった。

### 3.3 コロナボンド径と反射エコー特性値との関係

溶接試験体のコロナボンド径、ナゲット径の測定値および  $l_a$ ,  $l_o$ ,  $(l_a+l_o)/2$  を表-3に示す。

図-5にコロナボンド径と  $l_a$ ,  $l_o$ ,  $(l_a+l_o)/2$  との関係を示す。それぞれに対して相関係数をとってみると  $(l_a+l_o)/2$  とコロナボンド径との間には相関係数0.82と強い相関関係が見い出せたが、 $l_a$ ,  $l_o$  との間にはそれぞれ0.59, 0.60と相関関係は見られなかった。コロナボンド径 ( $L_c$ ) と  $(l_a+l_o)/2$  間の関係式を最小自乗法により求めると、式(1)で表わされる。

$$L_c = 0.9 \times (l_a+l_o)/2 + 5.2 \quad \dots(1)$$

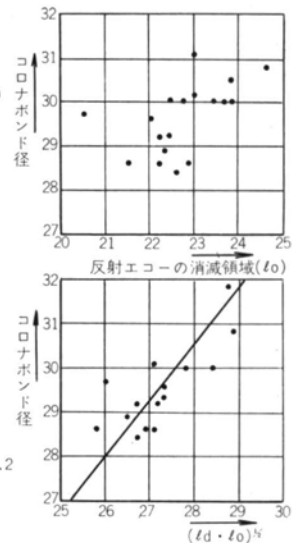
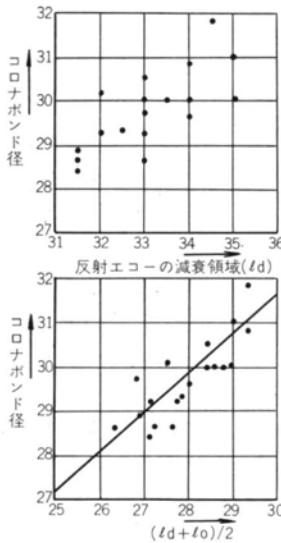


図-5 コロナボンド径と反射エコー特性値との関係

No.	板厚	$l_a$	$l_o$	コロナボンド径	ナゲット径	$(l_a+l_o)/2$
T-1-I	9	31	21.5	28.2	25.6	26.3
T-1-II	9	33	22.4	29.2	26.8	27.7
T-2-I	9	32	23.0	30.1	27.1	27.5
T-2-II	9	33	22.2	28.6	26.0	27.6
T-3-I	9	32.5	23.0	29.3	25.8	27.8
T-3-II	9	31.5	22.3	28.9	25.9	26.9
T-4-I	9	32	22.2	29.2	25.2	27.1
T-4-II	9	31.5	22.9	28.6	25.1	27.2
T-5-I	12	34.5	24.0	31.8	26.5	29.3
T-5-II	12	31.5	22.6	28.4	23.2	27.1
T-6-I	12	34	23.8	30.0	26.2	28.9
T-6-II	12	33	23.8	30.5	26.7	28.4
T-7-I	12	34	24.6	30.8	25.1	29.3
T-7-II	12	34	22.0	29.6	23.6	28.0
T-8-I	12	35	23.0	31.0	24.3	29.0
T-8-II	12	33	(20.5)	29.7	23.9	26.8

表-3 溶接試験体の測定結果 (単位: mm)

### 3.4 ナゲット径と反射エコー特性値との関係

図-6にナゲット径と  $l_a$ ,  $l_o$ ,  $(l_a+l_o)/2$  との関係を示す。3.3と同様にそれぞれに関して相関係数をとって見たが、コロナボンドと  $(l_a+l_o)/2$  の場合のような強い相関関係は見られなく、反対にどの場合もかなり強い分散を示した。図-6は溶接試験体の板厚の違いを無視して

プロットしてある。そこで、ナゲット径には板厚が影響をおよぼす可能性を考慮して板厚別の分布をみると、板厚9mmはグラフ左上方に、板厚12mmは右下方に分布している。しかし、板厚別にそれぞれのナゲット径との間の相関係数をとってみても、いずれの場合にも強い相関関係は見い出されなかった。

#### § 4. 考 察

図-4で示した試験体突出部径( $D$ )と $(l_a+l_b)/2$ 間の関係式を式(2)に示す。

$$D=1.05 \times (l_a+l_b)/2+2.7 \quad \dots\dots(2)$$

この式(2)を3.3で求めた式(1)と比較すると両式がともに実験式であることを考慮すれば、両式の直線の傾きはよく一致していると判断される。すなわち、3.1より求めた標準試験体突出部径の変化に対する $(l_a+l_b)/2$ の変化量と、3.3で求めた溶接試験体のコロナボンド径の変化に対する $(l_a+l_b)/2$ の変化量は近似しており、この $l_a, l_b$ の相加平均値からコロナボンド径を推定することが可能と思われる。

ナゲット径に関しては、いずれの反射エコー特性値とも強い相関関係が見い出せなかった。これは反射エコーの感度が、完全溶着部であるナゲット部に負うのではなく、ナゲット周囲に電極チップの圧下力と溶接入熱によって生成される圧着部であるコロナボンド部に負うためであると思われる。しかし超音波の反射、伝播の性質から、すべてのコロナボンド部が標準試験体の突出部と同様な反射エコーを示すのではなく、ある大きさ以上の圧着強度を有するものが突出部と同様な反射エコーを示すと思われる。したがって、式(1)ではこのコロナボンド部中の強度を有せず、超音波を反射する部分が定数項に加わっており、これは式(1)と式(2)の定数項の相違となつてあらわれていると思われる。この強度を有するコロナボンド部は溶接条件によって微妙に変化することが予想される。このような圧着部に対する反射エコーの挙動は、ガス圧着部に対する超音波探傷においても圧着面のフラットは強度が期待されるものと、期待されないもので超音波の反射の程度が異なることが報告されている<sup>2)</sup>。このように温度上昇にともなう結晶粒成長が2つの鋼材の境

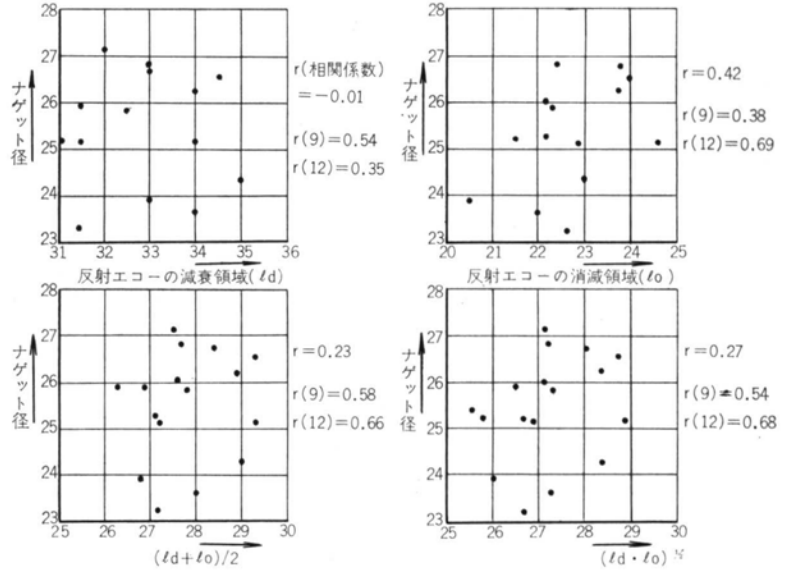


図-6 ナゲット径と反射エコー特性値との関係

界を越えていない圧着面のフラット部、あるいは圧着部にもその結合の程度によっては超音波は反射せず透過して進行すると思われる。

スポット溶接物のコロナボンド径の推定式に式(1)を適用することを考え、式(1)による推定値( $L_c$ )と実際のコロナボンド径( $L_c'$ )との比較を表-4に示す。表中の $r$ は $(L_c-L_c')/L_c$ の絶対値を示す。実際のコロナボンド径からのずれの度合を $R=\frac{1}{16}(\sum r^2)^{1/2}$ として表わすと $R=0.02$ となる。上記方法により中板・厚板のスポット溶接物のコロナボンド径を十分有意な誤差範囲内で推定することが可能と思われる。

#### § 4. 結 論

スポット溶接物およびその模擬試験体に対し、分割型探触子を用いた超音波により以下の結果を得た。

(1)スポット溶接物のコロナボンド径と反射エコー特性値 $(l_a+l_b)/2$ との間には相関関係が見い出された。本実験によれば $L_c=0.9 \times (l_a+l_b)/2+5.2$ なる実験式により両者の関係が導かれる。また、上記実験式により十分有意な誤差範囲内でコロナボンド径を推定できる。

(2)スポット溶接物のナゲット径と、反射エコー特性値との間には十分な相関関係が見いだせず、本実験で行なった方法によりナゲット径を測定するのは不可能と思われる。

(3)不完全溶着部であるコロナボンド部は超音波をすべて反射させるのではなく、その圧着の程度により超音波

No.	推定値	$r$	No.	推定値	$r$
T-1-I	28.9	0.010	T-5-I	31.6	0.006
T-1-II	30.1	0.031	T-5-II	29.6	0.042
T-2-I	30.0	0.003	T-6-I	31.2	0.040
T-2-II	30.0	0.049	T-6-II	30.8	0.010
T-3-I	30.2	0.031	T-7-I	31.6	0.026
T-3-II	29.4	0.017	T-7-II	30.4	0.027
T-4-I	29.6	0.014	T-8-I	31.3	0.010
T-4-II	29.7	0.038	T-8-II	29.3	0.014

表-4 コロナボンド径と推定値の比較

を透過する性質を持っていると思われ、本実験方法によってはコロナボンド部とナゲット部を判別することは不可能である。

#### 謝辞

本実験は日本建築学会点溶接委員会における「スポット溶接工作基準」作成の一環として行なわれたものである。本実験の遂行にあたり、早稲田大学鶴田明教授、同善利博臣氏のご助言、ご指導を受けた。また、溶接試験体は(株)桜井鉄工所より提供していただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

#### <参考文献>

- 1) 鶴田・善利他：“点溶接における品質管理システム—超音波の応答性に関する基礎的研究—” IIW Document-III-502-74
- 2) 藤盛他：“太径異形鉄筋（D38）ガス圧接部の超音波探傷試験に関する研究” 日本建築学会学術講演概要集（東北）昭和48年10月 pp. 1237~1240

