超音波溶接に関する研究 (1)*

—溶接片の形状効果について—

辻野次郎丸** 森 栄 司*** 実吉 純一****

Studies on Ultrasonic Welding (Report 1)*

—Effects of the Vibration Characteristics of Specimen on the Weld Strength—

by Jiromaru Tsujino**, Eiji Mori*** and Junichi Saneyoshi****

Ultrasonic Welding is the method to weld metal specimens clamped between a welding tip and an anvil by ultrasonic vibration energy, and the direction of welding tip vibration is parallel to the specimen surfaces. It is expected that the vibration characteristics of specimens has direct affects on the weld strength.

The purpose of the study is to investigate the effects of specimens vibration characteristics on the weld strength.

At the experiments, the frequency auto-tracking and constant vibration velocity control type welding equipments are used.

The results obtained are as follows;

- 1) Equivalent circuit of weldment is derived.
- 2) Weld strength is affected by the resonance and anti-resonance of longitudinal and bending vibration etc of specimens.
- 3) Welding is almost impossible in the case the upper specimen is at anti-resonance of longitudinal vibration.
- 4) Adequate change of vibration direction is useful to obtain stable weld strength.

1. 緒 言

超音波金属溶接は超音波振動の弾性エネルギーにより金属を固相で接合する方法で、他の方法と比して、異種金属、異なった寸法、板厚の試料を容易に接合できるなど多くの特長を有している。

本研究は、主として振動的な立場から、超音波溶接を行なう場合の溶接強度に影響する溶接時の種々の条件のうち、上下溶接片の形状とその組合せによる溶接強度との関係を明らかにすることを目的とした。

超音波振動による金属溶接片の溶接方法では、1) 溶接チップ、上下溶接片およびアンビルの間に三つの接触面が通常存在し、この間の相対速度に大小が生じる、2) 試料に、振動方向が面内方向であるために縦振動がのり、また剪断方向のひずみにより曲げ振動などがあるため、溶接強度が同一作業条件でも変化する事が

予想される。

筆者らは、溶接部の振動特性につき考察を加え、また定量的な測定を行なうために、振動周波数自動追尾—振動速度一定保持形の溶接装置を設計、試作し、溶接条件（振動振幅、静圧力、作業時間など）を明確にして溶接片の形状、振動方向などを变化させて実験、測定を行ない、溶接強度が溶接片の形状により大きく変化する効果…溶接片の形状効果…を見出し、検討を加えた。

2. 溶接部の等価回路について

2.1 溶接部の電氣的等価回路

片側から駆動する場合の超音波溶接の、溶接チップ、上下溶接片および溶接用アンビルの配置図を Fig. 1 (1) に示す。図から明らかなように3つの接触面（境界面①②③）が存在するが、このうち振動パワーを伝達させたいのは、溶接面②のみである。Fig. 1 (2) は溶接チップが振動速度 V_0 で横方向に変位したときの溶接部の振動速度分布を示したもので、上下溶接片はそれぞれ横方向（面内方向）の変位および厚さ方向の剪断ひずみによる変位をする。速度 V_1, V_2, V_3 は、それぞれの境界面①②③の相対速度を示す。Fig. 1 (3) は面内方向の速度振幅 V_{Iw}, V_{II} （縦振動速度）および厚さ方向の速度振

*原稿受付 昭和53年2月3日 (昭和52年12月8日 抵抗溶接 研究委員会にて発表)

**正 員 神奈川大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Kanagawa University

***正 員 東京工業大学精密工学研究所 Research Laboratory of Precision Machinery and Electronics, Tokyo Institute of Technology

****正 員 玉川大学工学部 Faculty of Engineering, Tamagawa University

Fig. 1 Vibration Velocity Distribution of Weldment.

Fig. 2 Equivalent Circuit of Weldment.

- (1) Equivalent Circuit of Weldment.
- (2) Equivalent Circuit of Specimens.
- (3) Longitudinal & Bending Vibration Impedance Z_l , Z_b vs Specimen Length.

幅 V_{bw} , V_{bt} (曲げ振動速度) を分離して示したものである。

溶接部の等価回路は、振動系を含んだ電気-機械変換部、各境界面の等価機械 impedance Z_1 , Z_2 , Z_3 、溶接用アンビルの等価機械 impedance Z_a および上下部溶接片の 2-port 表示により Fig. 2-(1) のようになる。各境界面に加わる振動力は、 $\dot{Z}_1 \cdot \dot{V}_1$, $\dot{Z}_2 \cdot \dot{V}_2$, $\dot{Z}_3 \cdot \dot{V}_3$ となる。各溶接片の 2-port 表示で、溶接片の面方向 (長さ方向) および剪断 (厚さ) 方向の変位成分は、等価機械 impedance Z_l および Z_b の直列および並列回路でか

ける。 Z_l および Z_b の両者の影響は、たとえば Fig. 2-(2) のように Γ 型回路などで表現できる。

溶接片の縦振動 impedance Z_l および曲げ振動 impedance Z_b は、各振動の波長 λ に対して Fig. 2-(3) のように変化し、 $\lambda/4$ の奇数倍のとき最大となり (反共振)、偶数倍のとき最小 (共振) となる。このため上記の等価回路を考慮することにより、(1) 上部溶接片の長さが、縦振動の $\lambda/4$ の奇数倍、および曲げ振動の $\lambda/2$ の整数倍のとき溶接困難となり、また縦振動の $\lambda/2$ の整数倍および曲げ振動の $\lambda/4$ の奇数倍のとき溶接が容易であり、(2) 下部溶接片長さが、縦振動および曲げ振動の $\lambda/2$ の整数倍のとき溶接困難となり、また $\lambda/4$ の奇数倍のとき溶接が容易となると考えられる。また等価機械インピーダンス Z_1 , Z_3 および Z_a は大なほうが、溶接面の機械インピーダンス Z_2 に振動エネルギーを有効に伝達できる。このため溶接チップおよびアンビルの形状、表面粗さ、表面状態に注意を払わなければならない。

2.2 溶接片の振動について

細長い溶接片の場合、(1) 溶接チップの振動方向が溶接片の長さ方向の場合、面内方向の変位によって縦振動が、厚さ方向の変位によって曲げ振動が励振される。

(2) 振動方向が横方向 (長さ方向と直角) の場合、面内方向の変位により、溶接片の幅により決まる曲げ振動が、また厚さ方向の変位により溶接片の厚さにより決まる厚みすべり振動がのると考えられる。このうち厚みすべり振動は、通常の試料厚さおよびチップによる変形を考慮に入れると励振される可能性は殆んどない。

溶接片に各種の振動が励振されることにより、(1) 溶接部を駆動するのに難易が生じ、また (2) 溶接片の振動が共振、反共振に近づくことにより振動応力による疲労破壊が起り、溶接強度に影響をおよぼす。

(1) 板および線にのる縦振動の変位 $\xi(x)$ および応力 $\sigma(x)$ は、位置 x で、例えば $\xi(x) = A \sin kx \cdot \sin \omega t$, $\sigma(x) = -E \cdot \partial \xi(x) / \partial x = -kAE \cos kx \cdot \sin \omega t$ となり、また試料にのる縦振動の波長 λ は、 $\lambda = 2\pi \cdot C_l / \omega$ となる。ここで A : 変位振幅, $k (= \omega / C_l)$: 波長定数, C_l : 縦波の音速, E : 弾性定数, ω : 角振動周波数である。

(2) 板にのる曲げ振動の垂直な変位 $y(x)$ は、よく知られているように

$$y(x) = A_b \left[\cos \frac{m}{2} \cosh \frac{mx}{l} + \cosh \frac{m}{2} \cdot \cos \frac{mx}{l} \right]$$

ここで m は曲げ振動の次数 N で定まる定数で、 l : 試料の長さ, h : 試料の厚さである。(端面自由で中央がループである振動姿態)

板の表面の応力 $\sigma(x)$ は、曲率半径 $R = y''(x) / [1 +$

$(y'(x))^2]^{3/2}$ となることから, 振動振幅が小であるとすれば,

$$\begin{aligned}\sigma(x) &= -\frac{hE}{2} \cdot \frac{y''(x)}{[1+(y'(x))^2]^{3/2}} \approx -\frac{hE}{2} \cdot y''(x) \\ &= -\frac{hE}{2} \left(\frac{m}{l}\right)^2 A_b \left[\cos \frac{m}{2} \cdot \cosh \frac{mx}{l} - \cosh \frac{m}{2} \right. \\ &\quad \left. \cdot \cos \frac{mx}{l} \right]\end{aligned}$$

となる. また曲げ振動の次数が数次以上の場合の波長 λ_b は, $\lambda_b = 2\pi \cdot (E \cdot I / \rho S \omega^2)^{1/4} = 2\pi (E \cdot h^2 / 12 \rho \omega^2)^{1/4}$, I : 断面 2 次モーメント, S : 試料の断面積, ρ : 密度……角形断面の場合……となる.

Fig. 3 Lateral Vibration Amplitude and Stress Distribution of Bending Vibration $y(x)/y(0)$, $\sigma_b(x)/\sigma_b(0)$. ($N=1, 2$ & 5)

Fig. 3 は, 曲げ振動の次数 $N=1, 2, 5$ の場合に面に垂直な振動振幅および表面応力の分布 $y(x)/y(0)$, $\sigma_b(x)/\sigma_b(0)$ の計算結果を示す. Fig. 4 に縦振動の節部に生じる最大応力および曲げ振動の面に垂直な変位振幅に対する振動板中央部 $x=0$ に生じる最大応力 $\sigma_{\max}$ を示す. 曲げ振動の次数 $N=1$ では, この応力値は $\times 0.765$, $N=2$ では $\times 1.01$ となり, また振動板の自由端附近では最大で $\times 1.1$ 程度の値となる. また曲げ振動が数次以上のとき, 面に垂直な変位 $y(x)$ と面に沿った変位 $l(x)$ の最大値は小振幅 ($ka_b \ll 1$) のとき $y(x)_{\max}/l(x)_{\max} \approx 2/kh$ となり, 試料厚さ h により変化し, 特に板厚が数 mm 以下の場合には, 同一溶接チップ振動振幅においても, 面に垂直な変位はかなり大になる.

3. 実験装置

使用した超音波溶接装置の概略を Fig. 5 に示す. 溶接装置の振動系は, 共振周波数 20.3 kHz のニッケル磁ひずみ振動子 (端面面積 21 cm²) にエキスポネンシャ

Fig. 4 Maximum Stress $\sigma_{\max}$ vs Longitudinal & Bending Vibration Amplitude.

Fig. 5 Arrangement of Welding Equipment.

ルホーン (鋼製, 変成比 6) を接合し, これに一波長長の縦振動共振棒 (鋼製, 18×30 mm) をネジ接合したもので, この中央ループ位置に溶接用チップ (鋼製, 70 R, 滑り止めの刻み目つき) をネジ接合した. 溶接用アンビルは, 縦振動の 1/2 波長長さのもので, 作業部分として中央ノード位置を用い, 滑り止めのため細目やすりをろう接した.

静圧力は, 溶接時の静圧力を一定にするためにスプリングアクチュエータを介して, 油圧シリンダにより加えた. 溶接用振動系は, 振動棒の端面に振動検出用コンデンサピックアップを設置し, 共振周波数自動追尾一振動速度一定保持形の制御回路を構成し, 6 kw の電力増幅器を用いて駆動した.

溶接試料としては, 市販の厚さ 0.5 mm および 1.0 mm のアルミ板 (JISA1100P, 引張り強さ 14.2 および 14.0 kg/mm²) を幅 14 mm に切断して (母材強度 98 および 199 kg), 試料長さを 25~250 mm として用いた. 試料の表面は無処理のままとし, 重ね合せを 10 mm として溶接を行なった.

5. 実験結果と考察

5.1 上部溶接片長さによる溶接強度の変化

振動方向を試料の長さ方向 (交角 $\theta = 0^\circ$) として,

厚さ 0.5 mm および 1.0 mm のアルミ試料を、下部溶接片長さを70および 65 mm 一定として、上部溶接片長さを 35~250 mm 変化させて、溶接強度を測定した結果を Fig. 6 に示す。溶接時の作業条件（振動振幅、静圧力、溶接時間）は、厚さ 0.5 mm および 1.0 mm の試料についてそれぞれ、 $6.7 \mu_{p-o}$ （片振幅）、80 kg, 3.0 sec, および $8.7 \mu_{p-o}$, 100 kg, 3.0 sec, 一定とした。またこれらの溶接試料の強度を測定するために引張り試験を行なったときの溶接部の破断状態を Phot. 1 に示す。

この結果から、板厚が 0.5 mm および 1.0 mm のいずれの場合にも溶接強度は上部溶接片長さによって同様

Fig. 6 Effects of upper specimen length on welding strength.
Specimen; Aluminum, thickness = 0.5 mm [Vib. Amp. 6.7μ , Clamp. Force 80 kg, Weld Time 3.0 sec] & 1.0 mm [8.7μ 100 kg, 3.0 sec]. Vibration Direction $\theta = 0^\circ$. Lower Specimen Length = 70 & 65 mm

Photo. 1 Welded Condition vs (1) Upper & (2) Lower Specimen Length.

な変化をし、上部溶接片長さが約 65 mm および 190 mm 附近の比較的せまい部分では溶接強度が殆んど得られない。

この部分では上部溶接片と溶接チップの溶着がはなはだしく、チップの圧痕も大であるが、上下溶接片間の溶接部では殆んど溶接が行なわれておらず、また溶接部周辺にクラックが入りがちで、溶接条件を上げて溶接片が破断してしまい、十分な溶接強度を得ることが不可能である。他の部分では溶接強度の変動が比較的小で、溶接条件を上げることにより母材強度の80%以上の強度を得ることができる。

溶接片にのる縦波の音速は、棒中の音速と板に沿った音速の中間であると考えられる。振動周波数を 20.3 kHz とすれば、アルミ溶接片にのる縦振動の波長を λ とすれば、 $\lambda/4 = 61.4 \sim 66$ mm, $\lambda/2 = 124 \sim 132$ mm, $3\lambda/4 = 186.7 \sim 198$ mm, $\lambda = 248.5 \sim 264$ mm (計算値) …となり、溶接片の板厚 0.5 および 1.0 mm では同一であると考えてよい。

また曲げ振動の波長 λ_b は、板厚によって変化し、振動次数が数次以上のとき、中央部での波長は、アルミ試料の場合、板厚 0.5 mm のとき $\lambda_b = 15.2$ mm, 板厚 1.0 mm のとき $\lambda_b = 21.6$ mm となる。

これ等の波長と、上記の溶接困難である上部溶接片の長さ約 65 mm, 190 mm とを比較すれば、この長さが各板厚ではほぼ同じであることを考慮すれば、これ等の部分では溶接片に、溶接部に振動ノード、溶接片の端部でループとなる $1/4$ 波長の奇数倍の縦振動がのっていると考えられ、上部溶接片が縦振動の反共振状態にあるとき溶接困難となる。また上記の結果から曲げ振動は直接に

は溶接強度に影響しないとも考えられるが、実際には、かなり大振幅の曲げ振動が溶接片にのっているのが観察されるため、溶接片の疲労破壊には大きな影響を与えられ考える。

5.2 下部溶接片長さによる溶接強度の変化

交角 $\theta = 0^\circ$ で、上部溶接片長さを 40 mm 一定として、下部溶接片長さを変化させて (35~250 mm) 溶接強度を測定した結果を Fig. 7 に示す。溶接条件は、板厚 0.5 mm で 6.7μ , 80 kg, 3.0 sec, 1.0 mm のとき 8.7μ , 100 kg, 3.0 sec 一定とした。

下部溶接片長さが約 65 mm,

Fig. 7 Effects of Lower Specimen Length on Welding Strength. Specimen; Aluminum, thickness=0.5 mm [6.7 μ , 80 kg, 3.0 sec] & 1.0 mm [8.7 μ , 100 kg, 3.0 sec].
Upper specimen Length=40 mm. $\theta=0$.

Fig. 8 Effects of Lower Specimen Length on Weld Strength. Upper Specimen Length=40 mm. $\theta=0$.

190 mm 近傍で溶接強度が大になっており、前記の結果から、溶接片の溶接部で振動ノードとなる縦振動の1/4波長の奇数倍のとき、溶接片が反共振状態となり溶接強度がとり易くなる。Fig. 7 中の板厚 0.5 mm, 長さ 65 mm のときの溶接強度が低下しているのは、溶接部附近にクラックが入ったためである。曲げ振動については、上部溶接片についてと同様に、溶接強度に直接には影響しないが、溶接チップ、アンビルによる溶接片の損傷とあいまって疲労破壊に留意しなければならない。

Fig. 8 は下部溶接片の長さが縦振動の1/4波長附近で、下部溶接片長さをわずかに変えて (65 mm および 70 mm), 振動振幅を変化させ、溶接強度を測定した結果で、溶接片長さが 5 mm 変わったのみで溶接条件が大きく変化することを示している。ここで振動振幅が大きいとき溶接強度が低下するのは、溶接条件が過大になって溶接部が、溶接チップ、作業台により損傷をうけ、また振動による疲労によりクラックが入るためである。

Fig. 9 Effects of Vibration Direction on Weld Strength.

Fig. 10 Effects of Upper Specimen Length. Specimen; Al, thickness=1.0 mm, lower specimen length=50 mm. Vibration Direction $\theta=90$.

5.3 振動方向を変えた場合

溶接チップの振動方向が溶接片の長さ方向 ($\theta=0$) のときには、上記の結果から、溶接片に1/4波長の奇数倍の縦振動がのり、反共振状態にあるとき溶接の難易が顕著となるが、(i) 上下溶接片長さが1/4波長附近のとき、振動方向 ($\theta=0$ および 90) による溶接強度の変化を測定した結果を Fig. 9 に示す。振動方向 $\theta=0$ のとき溶接困難な溶接片の組合せでも、振動方向を変える ($\theta=90$) ことにより容易に溶接が行なわれ、同一作業条件でも溶接強度が大になり、溶接チップによる圧痕も軽度になる。

(ii) 振動方向 $\theta=90$ で、板厚が 1.0 mm のアルミ溶接片を用いて、下部溶接片の長さを 50 mm 一定にして、上部溶接片長さを 25~250 mm にわたって変えて溶接強度を測定した結果を Fig. 10 に示す。溶接条件は、振動振幅 11.5 μ , 静圧力 100 kg, 溶接時間 8 sec および 12 sec. 一定とした。

上部溶接片の長さ全体にわたって、多少の溶接強度の変動はあるが、振動方向 $\theta=0$ の場合のように特に溶接に難易がある部分は明確でなく、溶接条件を適当に選

Fig. 11 Effects of Lower Specimen Length. Specimen; Al, thickness=1.0 mm, upper specimen length=85 mm. $\theta=90^\circ$.

Fig. 12 Weld Strength vs Vibration Amplitude. Specimen; Al, thickness=1.0 mm. (1) Vibration Direction $\theta=0^\circ$ [upper specimen length=40 mm, lower specimen length=70 mm]. (2) $\theta=90^\circ$ [85 mm, 50 mm].

択することにより一様な溶接強度が得られる。

(iii) 振動方向 $\theta=90^\circ$ で、上部溶接片長さを 85 mm 一定にして、下部溶接片長さを 25~250 mm にわたり変えて溶接強度を測定した結果を Fig. 11 に示す。

下部溶接片長さを変化させても、やはり溶接強度の大きな変動はないが、試料の横方向に曲げ振動（一波長長さ=80 mm 計算値）がのっているのが観察され、この反共振のとき、1/2波長（=40 mm）間隔で溶接容易なる部分が存在することが、溶接強度および振動子入力電流などから確認された。

(iv) 振動方向 θ が 0° および 90° のそれぞれの場合につ

Fig. 13 Weld Strength vs Clamping Force. Specimen; Al, thickness=1.0 mm. (1) $\theta=0^\circ$ [40 mm, 70 mm]. (2) $\theta=90^\circ$ [85 mm, 50 mm].

き、振動振幅および静圧力を変化させて、溶接条件と溶接強度の関係を測定した結果を Fig. 12 および 13 に示す。

振動方向 $\theta=0^\circ$ の場合は、振動振幅 11.5 μ 、静圧力 90 kg、溶接時間 8 sec、以上で母材が破断し、溶接強度は飽和しており、振動方向が直角 ($\theta=90^\circ$) の場合は、11.5 μ 、200 kg、12 sec になっても、溶接部が剥離し、母材が破断するのに至っておらず、この測定で用いた試料の組合せでは、前者の方が低い溶接条件で溶接できるが、一般的には、試料の組合せにより溶接条件が変化すると考えられる。振動方向の如何にかかわらず、溶接の難易は、縦振動により大きく変わるが、曲げ振動によっては直接には大きな影響を受けないと考えられる。

6. 結 論

細長い形状の溶接試料を用いて、溶接条件を明確にして溶接実験を行なった結果、

1) 溶接片長さの組合せによって溶接に難易ができる現象（溶接片の形状効果）を見出した。

2) 形状効果による溶接強度の変化は、上下溶接片で逆になる。

3) 溶接強度の変動の原因は主として溶接片の縦振動の反共振および共振であり、曲げ振動は直接的には大きな影響を有しないが、振動応力による疲労破壊に注意が必要である。

4) 溶接チップの振動方向を適宜変更することは, 安定な溶接を行なうために有用である。

ことがわかった。

また溶接部の各部分の影響を見通すのに有用な等価回路を提案した。

参 考 文 献

1) 超音波技術便覧, 日刊工業

- 2) 森, 辻野, 石田; 端子と導線の超音波溶接に関する研究, 音響学会講演論文集 (S37年5月) P105
- 3) 森, 辻野; 端子と導線の超音波溶接について, 通信学会超音波研究科資料 (1962, 7)
- 4) 森, 辻野; 超音波溶接に関する2, 3の実験, 音響学会講演論文集 (S37年10月)
- 5) 森, 辻野, 吉田; 超音波溶接に関する2, 3の研究, 音響学会講演論文集 (S38年5月) P37
- 6) 実吉, 森, 辻野; 超音波溶接に関する2, 3の研究, 通信学会超音波研究会資料 (1963, 10)
- 7) 辻野; 超音波金属溶接に関する研究, 溶接学会抵抗溶接研究会資料, RWS-40-77, (1977, 12)

光干渉法による鋼材切欠先端の塑性流動の低温域における観察*

田村 博** 加藤 昇** 金 永植**

Observation of Plastic Flow Process near the Notch Front in Steel in Low Temperature Range by Optical Interference Method*

by Hiroshi Tamura**, Noboru Kato** and Young Sik Kim**

The dependence of plastic flow process on temperature and thickness, for slit notched three point bending specimen, was investigated by continuous direct observation, using optical interference method. The relationship between the degree of plastic constraint and plastic flow process or applied load was cleared. Moreover, the cleavage fracture behaviours were discussed based on the observed plastic flow processes.

Main results obtained are as follows

- (1) The plastic flow processes in low temperature region and the degree of plastic constraint, can be estimated by the optical interference method.
- (2) The state of stress triaxiality is characterized by the transition behaviour from the stage of local yielding to that of hinge type plastic flow.
- (3) The temperature effect on the size of plastic zone appears only at the stage of hinge type in plastic flow process.
- (4) In slow bend test of Charpy size specimen, the cleavage fracture occurs either at stage of local yielding or after the general yield.

1. 緒 言

鋼溶接構造物の低温域におけるぜい性破壊の特性を解明するためには, 破壊に先行して鋼材の切欠先端で生じる塑性流動を十分に把握する必要がある。このため従来から低温用特殊光弾性皮膜材料, ならびに接着材を使って連続観察した研究結果がいくつか報告されている¹⁾。

しかし, 低温域における塑性流動の温度依存性については, なお不明な点が多い。

前報²⁾では, 光干渉法による鋼材の切欠先端のひずみ分布測定について報告した。この方法は, 特に低温域で光弾性皮膜法のような温度の影響を受けずに鋼の表面に現れる塑性流動を直接観察でき, また実験の簡単な点など非常に優れた長所を持っている。本報では, この方法を使って3点静的曲げ試験におけるスリット切欠先端の塑性流動を, 破壊に至るまで連続観察して, 温度および

*原稿受付 昭和53年2月28日 (昭和52年度秋季全国大会にて発表)

**正 員 東京工業大学 Member, Tokyo Institute of Technology