

Fig. 6 Comparison of theory and photoelastic experiment

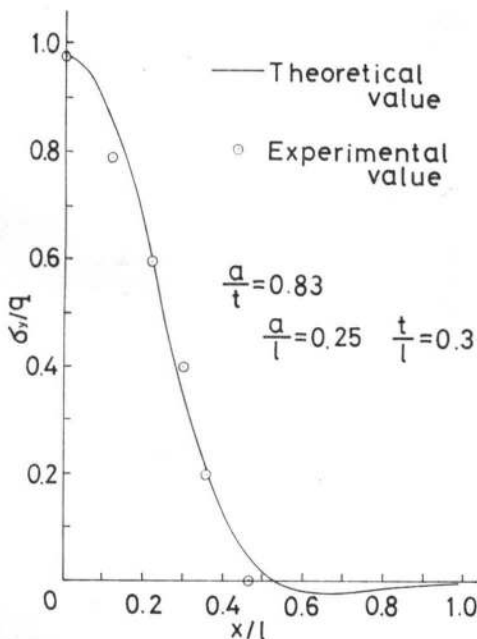


Fig. 7 Comparison of theory and photoelastic experiment

2枚分の板厚の一枚板の中間線上の応力分布と同じであると仮定したものであったが、この仮定が妥当であることを Fig. 8 に示す。すなわち1枚の板の板厚の中心線上の応力分布と、2枚の等厚板の接触部の圧力とを光

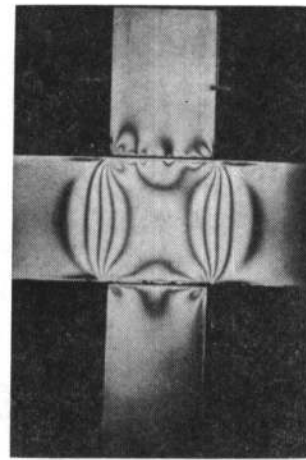


Photo. 1 Stress distribution in model specimen of photoelastic experiment

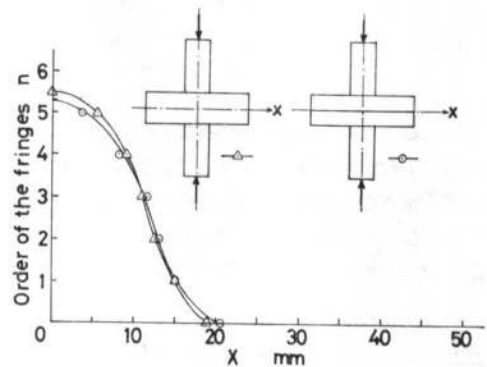


Fig. 8 Comparison of stress distribution in separate specimen and integrated one

弾性試験で比較すると、ほとんど同じ高次数分布であることがわかる。

以上の二次元モデルによる実験結果と計算結果との比較において見られた現象は、軸対称の場合にもあってはまるものと考えられる。

4. 計算結果のまとめ

前述のように Fig. 3 と Fig. 4 において引張応力部分が現われていることは、とりもおさず sheet separation の存在を示すものである。すなわちその内側の圧縮応力の部分が接触部にあたり電流の通路となる。この部分の面積こそ電流密度を決定し、温度上昇速度を決定し、溶接結果に重大な影響を及ぼす重要な要因である。

Fig. 3 と Fig. 4 の圧縮応力部分の径 ($2r_0$) と電極径 ($2a$) および板厚 t の関係を調べるために、横軸に a/t 縦軸に r_0/t をとって両者の関係を示すと Fig. 9 の

5.2.1 試験片の形状、材質、表面

Fig. 11 に示すように試験片は、溶接時にプロジェクション同士を背中合わせに正確に位置ぎめをする必要があるため、両側にけられている穴と、このプロジェクションの位置は正確に決めなければならない。

この試験片の加工のために、われわれは Photo. 2 に示すような治具を用いた。すなわち、あらかじめ正確な間隔で穴のけられている試片を、この治具にネジでチャックし、旋盤によってプロジェクションを削り出した。こうすることによって、溶接時には、試験片の穴の位置をそろえるだけで、プロジェクションは正確に重ねることができる。また溶接箇所は穴と穴との中間に位置するので、後で述べるねじり試験を行なう時に、偏心がなく正確な強さが測定できる。板厚は主に、1.6, 2.3, 3.2 mm を用い、プロジェクションの径は、8, 6, 5, 4, 3 mm として、いろいろな板厚とプロジェクションの径との組み合わせをつくった。

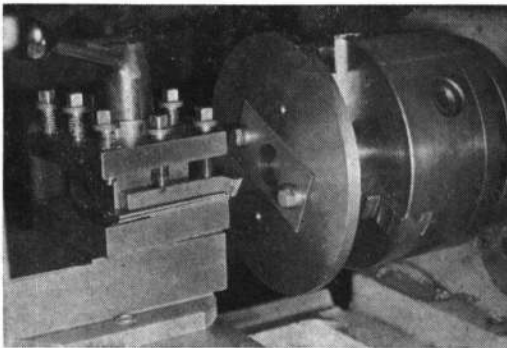


Photo. 2 Jig for machining special welding specimen

試験片の材質は、最も一般的で、表面状態が安定しており、接触抵抗の測定等にも都合のよい軟鋼を用い、表面はエメリーペーパーの3番で磨いた。

5.2.2 電流及び加圧力の測定

本実験では空気圧式直上加圧型単相溶接機(50 Hz)を用い加圧力の測定には、加圧シリンダーと直列に挿入してあるロードセルを、あらかじめ較正して用いた。通電中に加圧力の変化があることは従来知られているが、本実験においてデータ中に示されている加圧力は通電前の値であり、通電中に変化する量は考慮していない。

電流の測定は、瞬間電流計と溶接機の一次回路に挿入された shunt 抵抗によって測定した。瞬間電流計は溶接電流の平均値を測定する上には便利であるが、通電時間が短い場合や、波形制御を深くかけた場合には誤差が大きくなるので、あらかじめ一枚板に充分な時間(30サイクル)通電し、その時のビジグラフの振幅と瞬間電流

計の読みとを基準にした。すなわち溶接電流は、その時のビジグラフの振幅と基準の振幅との比を基準の電流に掛けることによって求めた。

5.2.3 ねじり試験

本研究においては、圧着部の径を正確に測定する必要がある。十字引張試験や、せん断引張試験は、実際の強さを知る上では有効であるが、板の変形が大きく圧着部を観察する上には不便である。そこで本実験においては、試験片が変形しない方法として、ねじり試験を行なった。

Photo. 3 は、ねじり試験に使用した治具であり、二つの爪を試験片の穴に掛け、ねじり試験機にチャックした軸を静かに回して、ねじり強さを測定した。

この方法により、心配された板の座屈や変形もなく、板面のマクロ的な観察が著しく容易になった。

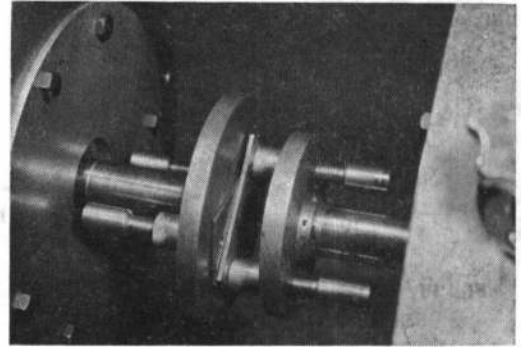


Photo. 3 Torsional strength test using special attachment

5.3.1 実験結果

以上述べた実験目的、実験方法に基づいて行なった溶接実験の結果を、できるだけ無次元量を用いてまとめ、理論解析との関連について調べた。

5.3.1 通電時間と圧着部径の関係

Fig. 12 と Fig. 13 に本実験から得られた通電時間と、圧着部径との関係の一例を示す。ここで加圧力はプロジェクションにかかる平均圧力が 20kg/mm^2 となるように調節してある。パラメーターの電流はナゲット形成までの時間が5~30サイクルくらいに分布するように適当に選んだ。これらの図によると圧着部径は、ある時間で一定値になり、さらに長く通電すると、ある時間で圧着部径は急激に上昇することが解る。

これは初期の板間接触部径が通電後も保たれることを示すものである。また圧着部径が急に上昇するのは、プロジェクションの消滅により、電極の加圧範囲が広がるために起るものと思われる。このように初期の板間接触部径が通電後の塑性化した状態においても保たれるの

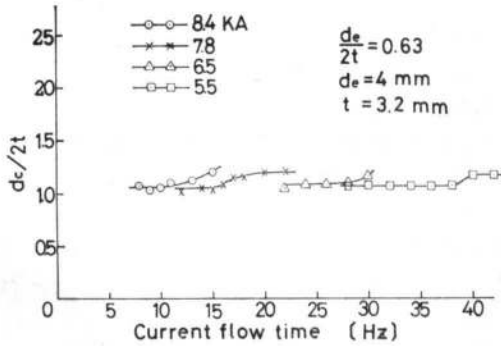


Fig. 12 Relation between current flow time and diameter of bonded area

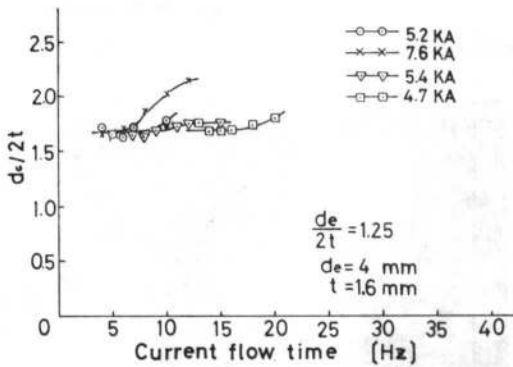


Fig. 13 Relation between current flow time and diameter of bonded area

は、電極による加圧力を半径方向へ伝達するせん断力が、塑性化した状態になると、外側に伝わらなくなるためである。これらの現象や、ナゲットの成長機構については後述する。

高電流短時間で溶接を行なうと、電極によるプロジェクトの冷却が間に合わなくなり、表ザリを起し、電極と板との接触面積を一定に保つことができなくなる現象が見られた。高電流短時間溶接において、圧着部径が急激に大きくなっているのはこのためである。

ここで圧着部と呼んでいる部分は、ナゲットとその周りの固相圧接された状態になっている部分のことであり、ナゲットの近くにおいては、Photo. 4 に示すように、拡散によって新しい結晶粒が発生していることがわかる。このように圧着部においては完全に電気的接触が保たれており、圧着部径と電流通路径とは同一と見なすことができると思われる。

以上のように電流が適当であれば、電流の通路は電極と板厚によって決定されることがわかった。われわれは色々な電極径と板厚の組み合わせについて同様の実験を行ない、電流の通路径と板厚や電極径との関係について

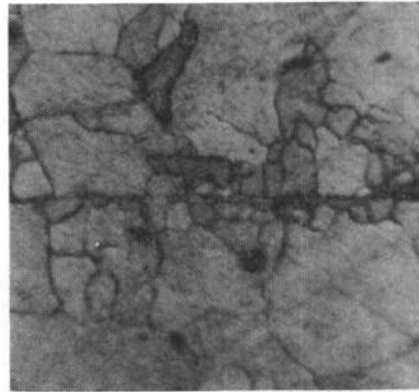


Photo 4 Microstructure of corona bond region

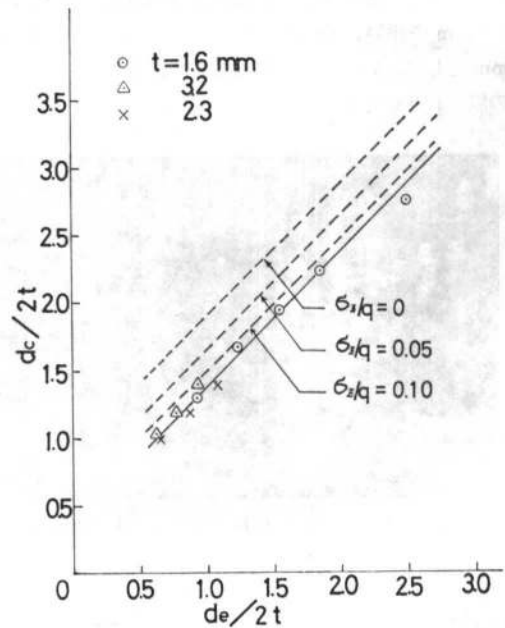


Fig. 14 Relation between the size of the bonded area and the electrode diameter

調べた。ただしここで電流の通路径とは板間接触部における圧着部径のことであり、Fig. 12 や Fig. 13 において圧着部径の一定になっているところの値である。

Fig. 14 に圧着部径 d_c と電極径 d_e の関係を板厚で無次元化して示す。この図によると $d_e/2t$ と $d_c/2t$ との間には直線関係があり、理論解析による接触部径と電極径の関係を表わす線と平行になることがわかる。ここで圧着部径の方が理論解析による接触部径よりやや小さくなるのは、接触抵抗の影響によるものと思われる。すなわち、Fig. 15 に示すような装置を用いて行なった接触抵抗の測定では、Fig. 16 に示すような特性のあることが解った。これによれば、圧力の低いところでは急激

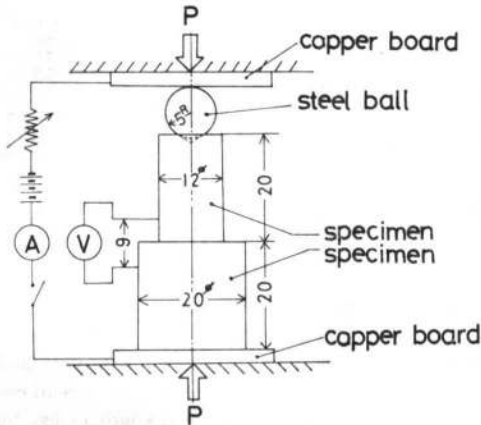


Fig. 15 Measuring apparatus of contact resistance

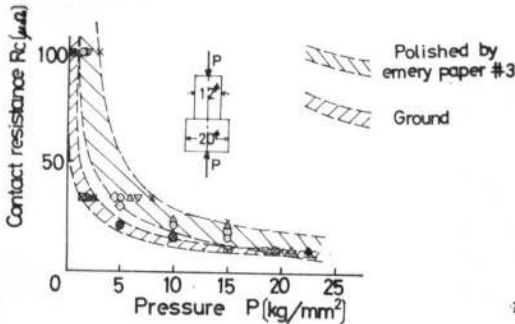


Fig. 16 Relation between pressure and contact resistance

に抵抗値が大きくなるためほとんど電流が流れないと考えられる。したがって実際の電流の通路は、sheet separation の内側の板間接触部径より小さくなる。また光弾性試験の結果にも見られたように、電極の先端が平坦でないことも理論的な接触部径よりも電流通路が小さくなっている原因の一つであろう。

前述のように初期の電流通路が保たれる現象は次のように説明することができる。Fig. 17 (a) に示すように、接触抵抗が低くなっている部分を電流が流れると、(b) に示すように、電流の流れた部分の接触抵抗が消えて、電流の流れる領域は明確になる。そしてその部分が熱膨張を起こすと、(c) に示すように sheet separation を起こすようになり、溶接点以上に温度上昇した部分がナゲットを形成する。二次元モデルの場合の実験と違うところは、三次元の場合には、このナゲットの中の圧力はほとんど電極加圧力と同じ大きさになると考えられる点であって、ナゲットの周辺のコロナボンドと呼ばれるところが軟化してくると、(d) に示すように、これを押し広げようとする。(Photo. 5) そしてさらに軟化するとチリとして外に吹き出す。このように

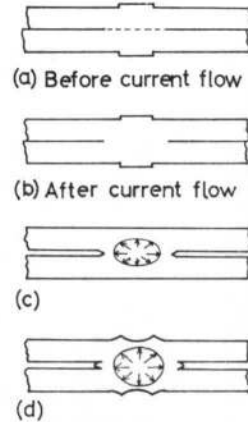


Fig. 17 Transition of welded part with current flow time

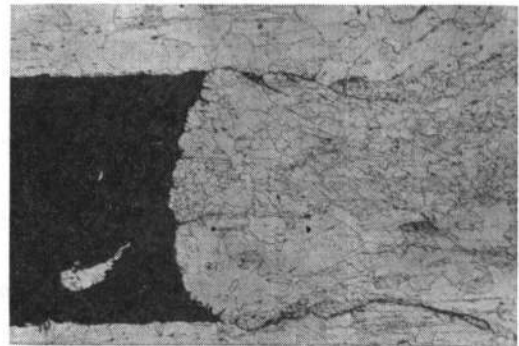


Photo. 5 Metal flow in the outermost region of corona bond caused by nugget expansion. Black part is filled up with resin.

してナゲットは成長し、圧着部はある時間一定に保たれるのである。

5.3.2 加圧力の影響

Fig. 18 に加圧力を変化した場合の通電時間と圧着部径、ねじり強さの関係を示した。これによると圧力が非常に低い場合には、中心の接触抵抗の低い部分の径が非常に小さくなり、この部分に電流が集中して早くから径の小さいナゲットを形成するが、径が小さくチリが発生するために強さが小さい。圧力を非常に高くすると、初期の電流通路が接触抵抗の影響を受けにくくなるため、Fig. 13 に示した電極加圧力 20 kg/mm² の場合より、ナゲット径はやや大きくなるが、温度が上昇するとすぐにプロジェクションがつぶれてしまい、電極の加圧範囲が広がってしまう。したがってナゲットを形成するだけの電流密度が得られなくなり、固相圧接のような状態となるため、強さが小さい。加圧力 10 kg/mm² で溶接したものは、Fig. 13 に示した加圧力 20 kg/mm² で溶接したものとほぼ一致し、ナゲットも良好で強さも強い

