

(昭和54年11月 日本造船学会秋季講演会において講演)

薄い軟鋼板の突合せ溶接時の過渡応力と 開先の変位挙動に関する研究 (第1報)

正員 辻 勇* 正員 吉 村 洋**

Studies on Transient Stresses and Deformation Behavior of Groove due to Butt-Welds
of Thin Mild Steel Plates (Ist Report)

by Isamu Tsuji, *Member* Hiroshi Yoshimura, *Member*

Summary

In order to prevent cracking and to predict thermal stresses and distortions developed as a results of welding, it is necessary to know the details of thermal and mechanical response of weldments. While experimental measurements of the stresses and strains surrounding a weld heat source are very difficult due to high temperatures caused by welding, it has now become possible to analyse the transient stresses and strains in the immediate vicinity of the welded joints with an aid of the recent progress in analytical technique of the non-linear problems by the finite element method.

Most of the former works in this field are concerned with the analyses of bead-on-plate welds. In an attempt to refine our knowledge and improve the degree of correlation with reality, more realistic analytical models are developed for calculating temperatures, stresses and strains resulting from butt-welds of mild steel plates by use of the finite element method taking changes of the thermal and mechanical properties of the material with temperatures into account. We solved the unstationary heat conduction problems first and based on the calculated temperature distributions, we analysed the uncoupled thermal stress problems with time depending varying boundary conditions. The material subjected to the welding thermal cycle is postulated to behave mechanically as an isotropic, elastoplastic and strain-hardening continuum obeying the Mises yield condition and the Prandtl-Reuss flow rule.

The elastoplastic stress distributions around a moving weld heat source, metal movements during welding and variation of forces and moments acting on tack welds are clearly presented. It has been shown that presence of root gaps play an important role in opening or closing behavior of groove and the magnitude of forces and moments acting on the tack welds ahead of the moving weld heat source. Some of the obtained results agree fairly well with experimental values.

1 緒 論

溶接欠陥の発生を防止し、溶接による応力や変形を予測して適切な溶接構造物の設計ならびに施工を行うためには、溶接時に生ずる過渡応力や継手の変位挙動の詳細を明らかにしておく必要がある。溶接後、継手に残留する応力や変形に関してはすでに多くの研究がなされており、それらの特性はほぼ明らかにされているが、溶接時の過渡応力や継手の変位挙動に関しては、理論解析や実験計測が著しく困難であるため、いまだ不明の点が少ない。

近年における電子計算機の発達に伴って、有限要素法による解析がこのような問題の理論的取扱いを可能にしたが、従来の研究の多くは平板のビード溶接^{1),2),3)}を対象としたものであり、境界条件が時々刻々に変化するような突合せ溶接継手に関しては熱弾性解析^{4),5),6)}がなされているのみである。また、従来の研究の多くは線形解析解による温度分布を採用しており、要素分割も著しく粗いことなどのために、解析結果の精度にも問題がある。

本論文では、非連成問題として溶接時の熱伝導解析と熱弾塑性応力解析を一貫して有限要素法により取扱う電子計算機プログラムを作成し、これを用いて突合せ溶接継手に生ずる過渡応力ならびに継手の変位挙動を解析した結果について報告する。

* 九州大学工学部

** 九州大学大学院工学研究科

2 解析モデル

Fig. 1 に、解析の対象である軟鋼板の寸法と要素分割を図示した。すなわち、 $10 \times 15 \times 0.32$ cm の板の中心線 x 軸上をビード溶接する場合と、この半幅を有する2枚の板をI開先で突合せ溶接する場合を対象とし、板の、 $1/2$ 領域を図示したように930個の三角形要素に分割した。要素の最小寸法は x 方向で0.25cm、 y 方向で0.15cmである。溶接は図中の原点から始まり、 x 軸上を1秒ごとに次の節点位置まで進み、 $x=15$ cmで終了する。溶接熱は、図示したように時刻 t においてその節

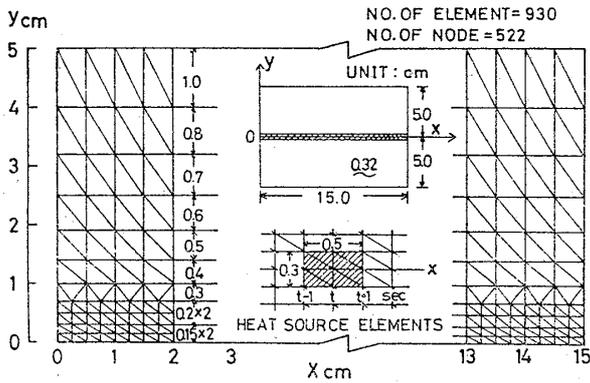


Fig. 1 Mesh sub-division

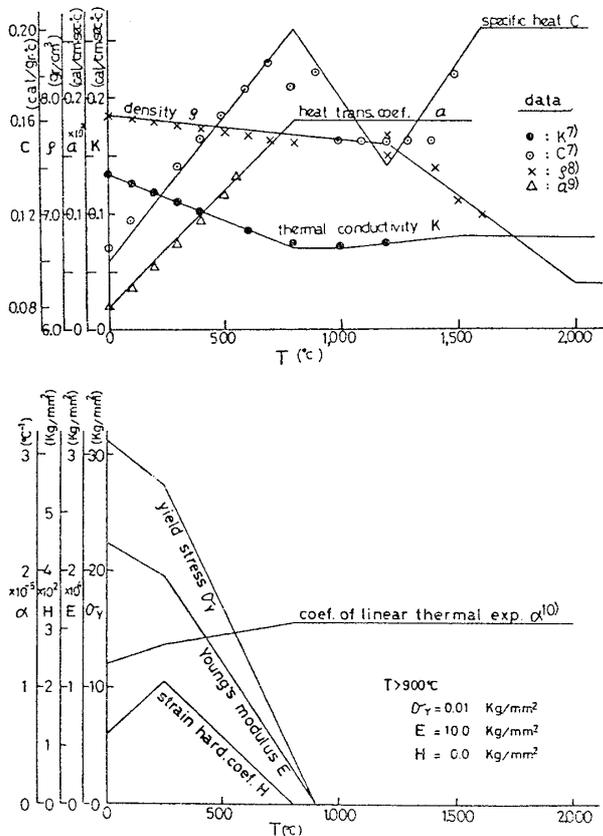


Fig. 2 Temperature dependency of physical and mechanical properties

点を中心とする $0.3 \times 0.5 \times 0.32$ cm の立方体の内部に均等に発生すると考えた。溶接条件は後述する実験との対応を考慮して、入熱量 193.3 cal/sec, 溶接速度 0.25 cm/sec とした。

Fig. 2 は、本解析で仮定した軟鋼材の物性値ならびに機械的性質の温度依存性を図示したものである。高温の物性値は不明な点が多いので図のように仮定した。また溶融域では溶融金属の流動による熱輸送などが問題となるが、この点についての考慮はなされていない。著者らは、さきに溶接時の温度解析の精度向上を目的として、物性値の温度依存性や潜熱の影響を考慮に入れ有限要素法により薄板溶接時の温度分布を解析し、このような方法で実際の溶接熱サイクルを精度良く評価できることを明らかにした。本論文においてもこの温度解析法を採用しているが、その詳細については既報の論文⁽¹⁾を参照されたい。熱弾塑性応力解析は、変位法による定式化^{(1),(2),(3)}に従い、等方性板と仮定し、平面応力問題として取扱った。900°C以上の温度域では塑性ひずみは消滅すると考えた。

Fig. 3 は、本計算のフローチャートである。時間増分は1秒とし、この間の温度増分をステップ①で求め、この温度増分にもとづいてステップ②~⑫において熱弾塑性応力解析を行う。なお、ステップ⑨における倍率 m は山田の方法⁽²⁾により決定した。

突合せ溶接継手の解析モデルは、ルート間隔がある場合とない場合について、それぞれ次のように考えた。ル

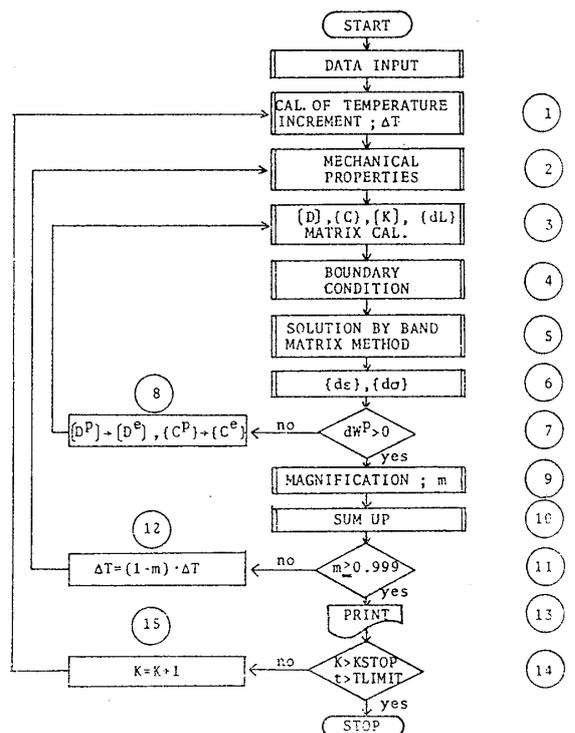


Fig. 3 Flow-chart for analysis

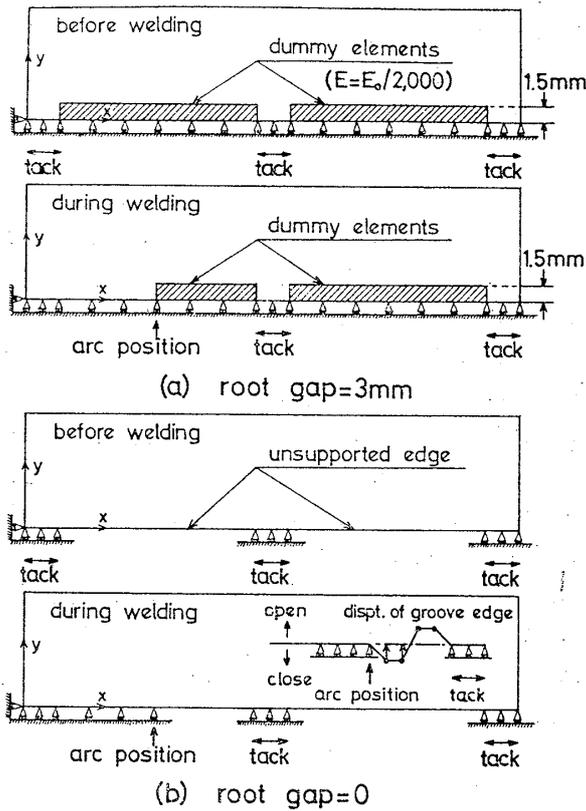


Fig. 4 Models for analysis

ート間隔がある場合は、Fig. 4(a)に示すように、溶接前の段階で斜線を施した部分の三角形要素は剛性がないものと仮定し、以下ではこれらをダミー要素と呼ぶことにする。すなわち、 $y=1.5\text{mm}$ における縦断面は仮付け位置を除いてI型開先面とみなす。計算上では、ダミー要素の縦弾性係数を基準温度における値の $1/2,000$ とした。熱源の進行に伴って熱源位置のダミー要素の縦弾性係数をその温度における値に戻し、それ以降は他の要素と同じ取扱いをする。すなわち、熱源前方にのみダミー要素が存在し、 $y=1.5\text{mm}$ の線上の節点変位を開先面の変位とみなすことにした。

ルート間隔がない場合は、Fig. 4(b)に示すように、仮付け位置を除いて溶接中心線を通る縦断面を開先面とみなす。熱源前方の溶接中心線上の節点は、開先が開く方向に変位することは自由であるが、互に溶接中心線を越えて変位することは物理的に不可能であるため、このような場合には、図中に矢印で示したような強制変位を与えて溶接中心線上へ押し戻すことにした。仮付け溶接は板の始端部、中央部および終端部の3箇所に設け、いずれも長さは 10mm とした。したがって、溶接線全長の20%を仮付け溶接が占めることになり、通常の実合せ溶接に比べるとかなり強固な仮付けになっている。なお、以下の記述における応力値は、斜辺を共有する2個の三角形要素の値の平均で表わした。

3 計算結果とその考察

3.1 溶接時の過渡応力

Fig. 5, 6, 7は、ビード溶接、ルート間隔がある突合せ溶接およびルート間隔がない突合せ溶接について、熱源が始端部、中央部および終端部の近傍にあるときの過渡応力分布を図示したものである。図中の破線は 900°C 、 700°C および 500°C の等温線を示す。

いずれの場合も、熱源より後方の応力分布はほぼ同一である。熱源のごく近傍は、高温の領域であり無応力状態となっている。冷却が進み温度が低下するにつれて、溶接線上の溶接線方向の引張応力が大きくなり、これは引張残留応力へと成長する。熱源のすぐ前方は2軸圧縮応力状態であり、とくに溶接線に垂直方向の圧縮応力はビード溶接とルート間隔がない突合せ溶接の場合が大きい。それより前方では、ビード溶接の場合には、溶接線に垂直方向の引張応力が生じているが、突合せ溶接では開先が存在するために、この引張応力は仮付け溶接の近傍に集中して働く。Fig. 5およびFig. 7においては、熱源が終端部に近づくと、終端部には溶接線に垂直方向の大きな引張応力が生じているが、Fig. 6ではこの値が著しく小さい。この引張応力の大きさは、熱源のすぐ前方に働く溶接線に垂直方向の圧縮応力の大きさと密接に関

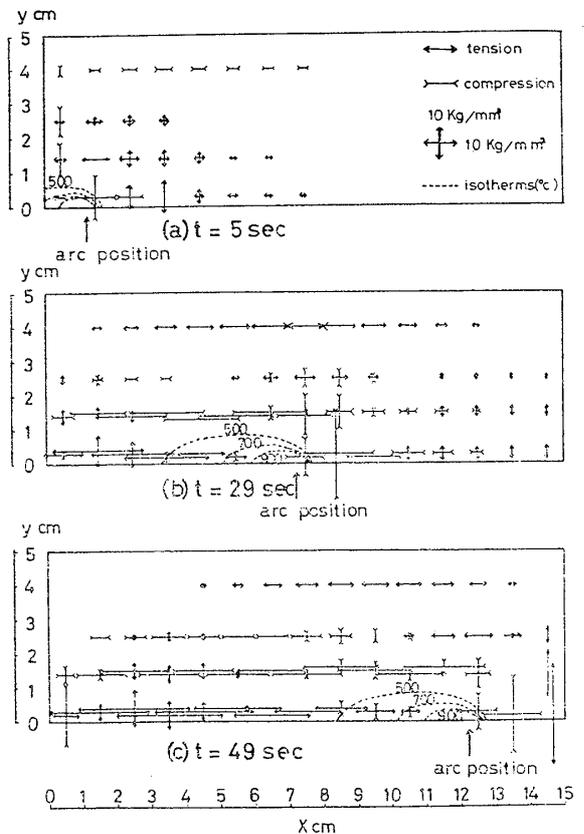


Fig. 5 Transient stress distributions during bead welding

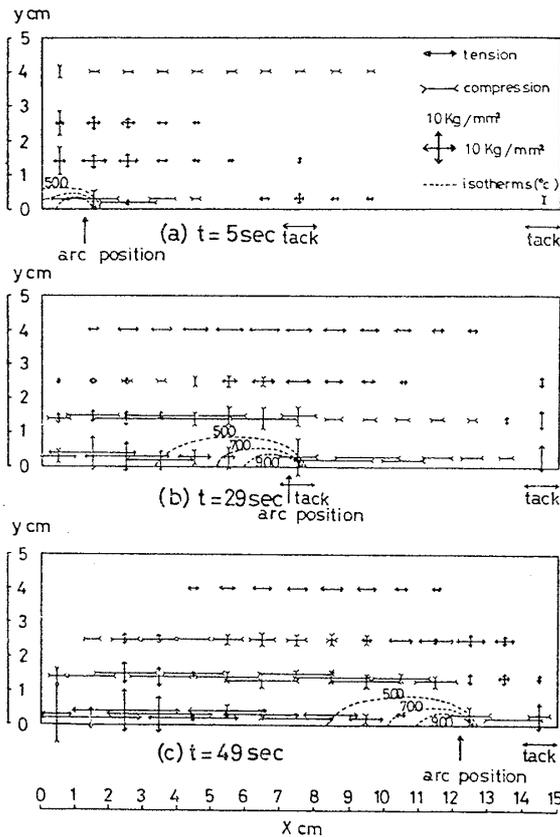


Fig. 6 Transient stress distributions during butt welding with root gap of 3mm

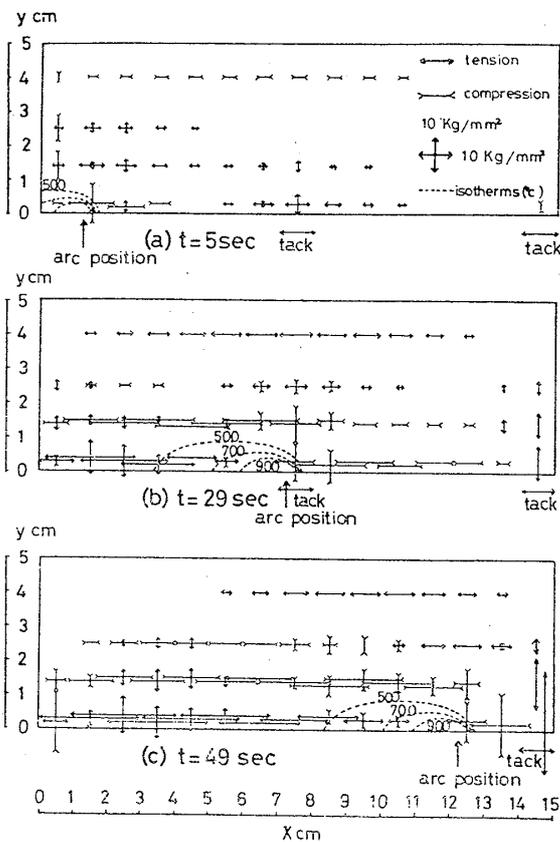


Fig. 7 Transient stress distributions during butt welding with zero root gap

連している。

以上の点をさらに明確にするために、溶接開始後 5 秒、19 秒および 39 秒経過した時刻における、溶接線上に働く溶接線に垂直方向の応力分布を Fig. 8 に図示した。ビード溶接の場合、熱源前方のこの応力は圧縮から引張りへと連続的に変化している。しかし、ルート間隔がある突合せ溶接では、熱源前方の開先面が自由端であり力を受けもつことができないので、仮付け溶接のみが応力を負担している。ルート間隔がない場合は、開先面が圧縮力を受けもつことができるので、ビード溶接の場合と同様に熱源直前に大きな圧縮応力が働いている。ただし、Fig. 8(a)における熱源直前の圧縮応力がビード溶接のそれに比べて著しく小さいのは、次のような理由による。これは、溶接開始直後であり熱源後方の溶接金属がいまだ高温のために変形しやすく、またのちに Fig. 12 で明らかにするように熱源前方の開先が大きく開く方向の変位を生じているためで、溶接始端部に特有の現象であると考えられる。Fig. 8(b)において、ルート間隔がない場合には、熱源直前に大きな圧縮応力が働き、中央仮付けと終端仮付けには引張応力が働いているのに対して、ルート間隔がある場合には、熱源前方の開先が自由端であるために、中央仮付けが圧縮応力を、終端仮付けが引張応力を負担している。Fig. 8(c)において、ルート間隔がある突合せ溶接継手の終端仮付けには、熱源に近い側に圧縮応力が、熱源から遠い側に引張応力が働いている。これは、ビード溶接やルート間隔がない突合せ溶接において熱源前方に分布している圧縮応力と引張応

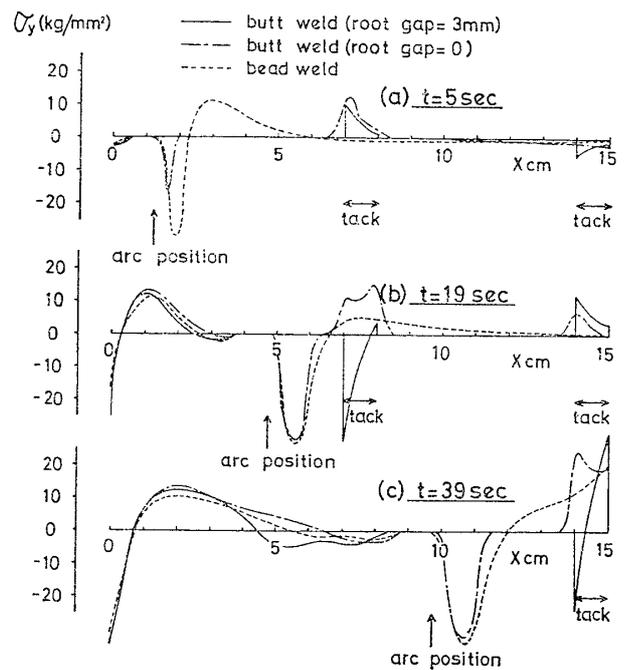


Fig. 8 Transient stress distributions acting across weld centerline

力が、この場合には終端仮付けのみに集中して働くことによるものである。

3.2 仮付け溶接に働く力と開先の変位挙動

Fig. 9 は、中央仮付けと終端仮付けに働く溶接線に垂直方向の応力分布の時間的変化を、ルート間隔がある場合とない場合について図示したものである。熱源が中央仮付けおよび終端仮付けの左端に到達する時刻は、それぞれ 28 秒と 56 秒である。熱源が仮付け溶接に近づくにつれて、ルート間隔がある場合には、仮付け溶接の熱源に近い側は圧縮降伏状態になるが、ルート間隔がない場合には、むしろこれと逆の傾向を示していることがわかる。

この応力分布を積分して仮付け溶接に働く力とモーメントを求め、それらの時間的変化を Fig. 10 に図示した。同一溶接条件でも、ルート間隔の有無により、仮付け溶接に働く力とモーメントに著しい相違があることがわかる。仮付け溶接に働く引張力は、ルート間隔がない場合の方がある場合よりも大きく、モーメントはむしろ逆の傾向を示している。ルート間隔がない場合、仮付け溶接に働く引張力は、熱源がその直前にくるまで増加し続け、熱源直前に存在する圧縮応力域の影響を受けると減少し始める。モーメントが急増し始める時刻は、この引張力が減少し始める時刻とほぼ一致している。ル

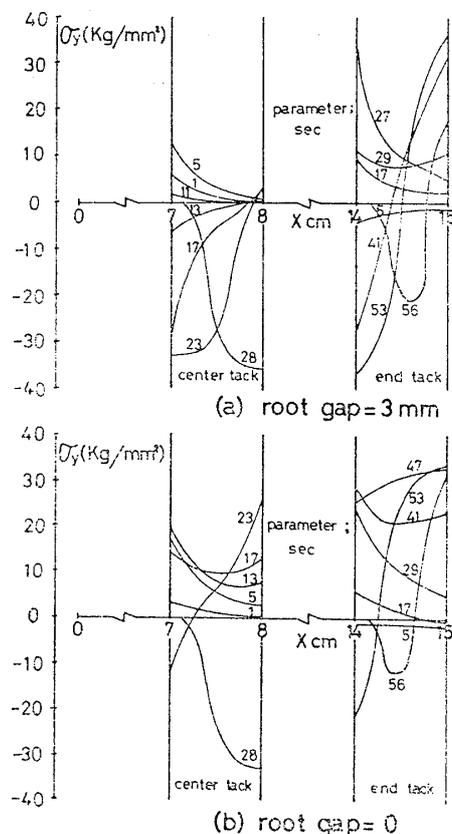


Fig. 9 Variation of transverse stress distributions acting on tack welds with time

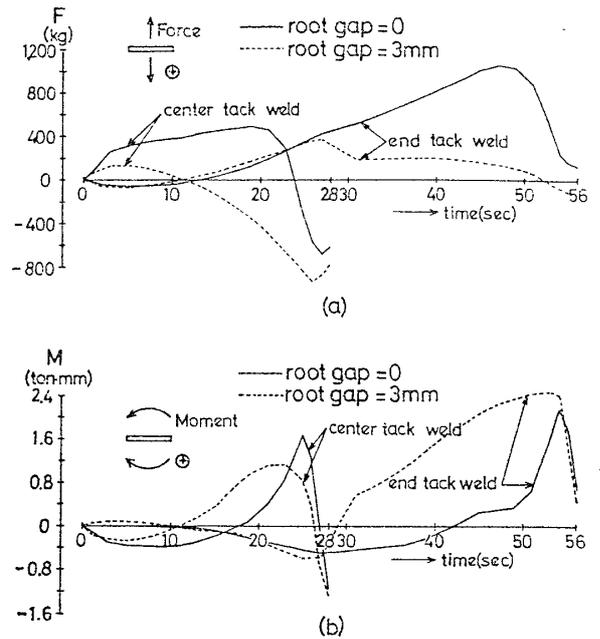


Fig. 10 (a) Variation of forces acting across tack welds with time

(b) Variation of moments acting on tack welds with time

ート間隔がある場合、仮付け溶接に働く引張力は早い時期に減少し始め、これとほぼ同時に正の向きモーメントが増加し始める。これは、熱源前方の開先が閉じるような変形をすることと関連している。

ルート間隔がある場合とない場合の突合せ溶接継手について、熱源前方の開先面の変位を、それぞれ Fig. 11 および Fig. 12 に図示した。変位は、開先が開く方向を正としている。ルート間隔の有無にかかわらず、熱源近傍の材の熱膨張のために、開先は閉じるような変形を生じ、熱源直前の開先面上の節点には、これに対応する変位が現われる。Fig. 11 に示すように、ルート間隔がある場合は熱源直前で開先が閉じるような変位を生じており、変位量ならびにこのような変位を生ずる範囲は、熱源の進行とともに増大する。そのために、Fig. 10 に図示したように、熱源直前の仮付け溶接に働く正の向きモーメントが増大するのである。しかし、ルート間隔がない場合には、2枚の板が互に重なり合うような変位を生ずることは不可能であるから、2節で述べたごとくこのような節点に強制変位を与えて溶接中心線に戻す操作が必要になる。このために、熱源直前の開先面に溶接線に垂直方向の大きな圧縮応力を生じ、それより前方の仮付け溶接には、これと釣合うような大きな引張力を生ずる。Fig. 12 から明らかなように、この場合には熱源前方の開先面は開先が開く方向の変位のみを生じており、いずれの時刻においても、この変位量はルート間隔がある場合の対応する値に比べて大きい。

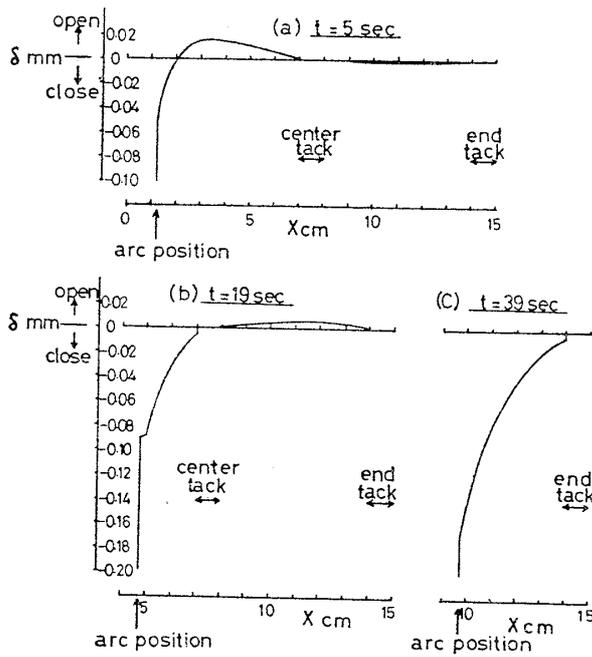


Fig. 11 Transverse displacements of groove edge δ mm of butt welded joint with root gap of 3mm

従来、手溶接のような小入熱溶接では開先が閉じ、サブマージアーク溶接のような大入熱溶接では開先が開く傾向があることが経験的に知られており、溶接熱や溶接速度、溶接物の寸法などの観点から種々の検討がなされてきたが、これまでに明確な結論は得られていない。手溶接のような小入熱溶接では溶込み不足を防止するため

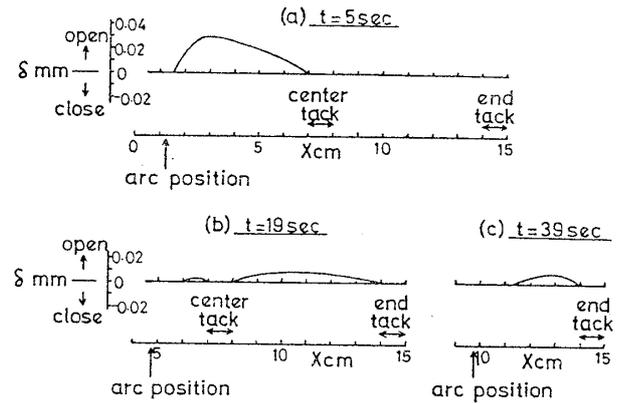


Fig. 12 Transverse displacements of groove edge δ mm of butt welded joint with zero root gap

に、ルート間隔をあけ、サブマージアーク溶接のような大入熱溶接では溶落ちを防ぐために、ルート面を密着させるのが普通である。いっぽう、ストロングバックで溶接終端部の開先変位を拘束した大入熱エレクトロガス溶接では、開先が閉じることが報告されている¹³⁾。

本解析により、同一溶接条件でも、ルート間隔がある場合には開先が閉じ、ルート間隔がない場合には開先が開く傾向があることが判明し、ルート間隔の有無が突合せ溶接継手の回転変形を支配する重要な要因の一つであることが明らかになった。本解析の対象は著しく入熱が少ない場合であるが、入熱が増すにつれてこのような傾向は一層顕著になるものと考えられる。このように、従来から知られている一見相矛盾するような実験事実も、

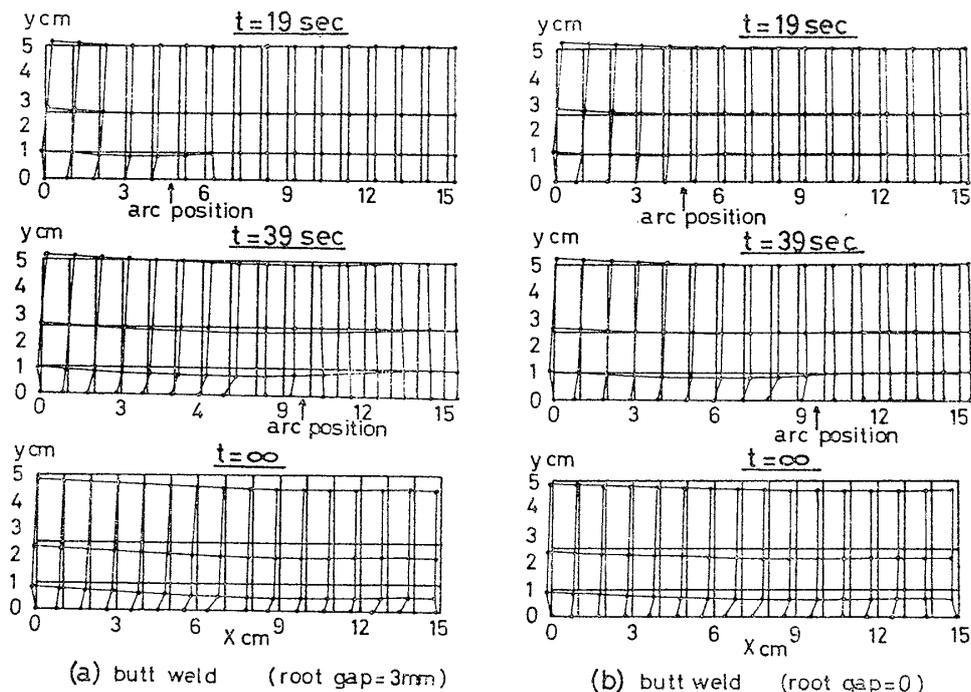


Fig. 13 Exaggerated distortions of weldments during and after welding (displacement $\times 20$)

ルート間隔の有無に注目して考えるならば、納得のゆく理解が得られるように思われる。

Fig. 13 は、ルート間隔がある場合とない場合の突合せ溶接について、それぞれ時刻 19 秒と 39 秒における過渡的な変形ならびに残留変形を、変位を 20 倍に拡大して図示したものである。時刻 19 秒および 39 秒では、熱源より後方は上に凹になるような変形を示している。この図からは明らかではないが、ルート間隔がない場合には、熱源前方の部分はわずかに上に凸になるような変形をしている。最終的には、いずれの場合にも板の終端側が内側に回転するような変形を示しており、横収縮量はルート間隔がある場合の方が大きい。

3.3 実験的検討

数値計算結果の妥当性を検証するために行った実験の概要を以下に記す。厚さ 3.2mm の SS41 材から Fig. 14 に図示したような寸法の試験片を採取し、図中に記した溶接条件で長手方向中心線に沿って TIG 溶接を行った。溶加金属は用いていない。溶接時の角変形はポールベアリングを用いた治具で拘束した。ルート間隔の有無による相違を調べるために、(a) 図の場合は開先部に約 0.5mm 幅のスリットを設け、(b) 図の場合は 2 枚の板の開先面を密着させ、仮付け部のみ全板厚にわたって仮付け溶接を行った。中央仮付けと終端仮付けの表裏に単軸ゲージをそれぞれ 3 枚ずつ貼り、溶接線に垂直方向

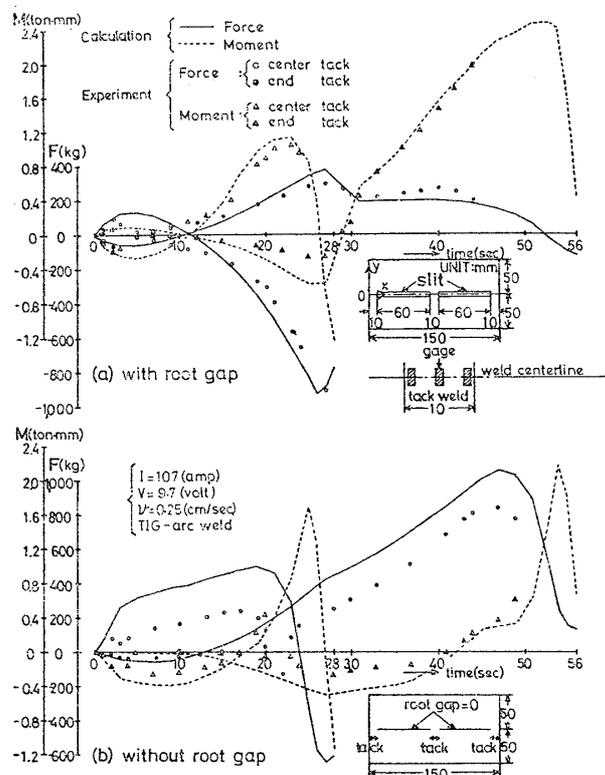


Fig. 14 Comparison of calculated and measured forces and moments acting on tack welds during welding

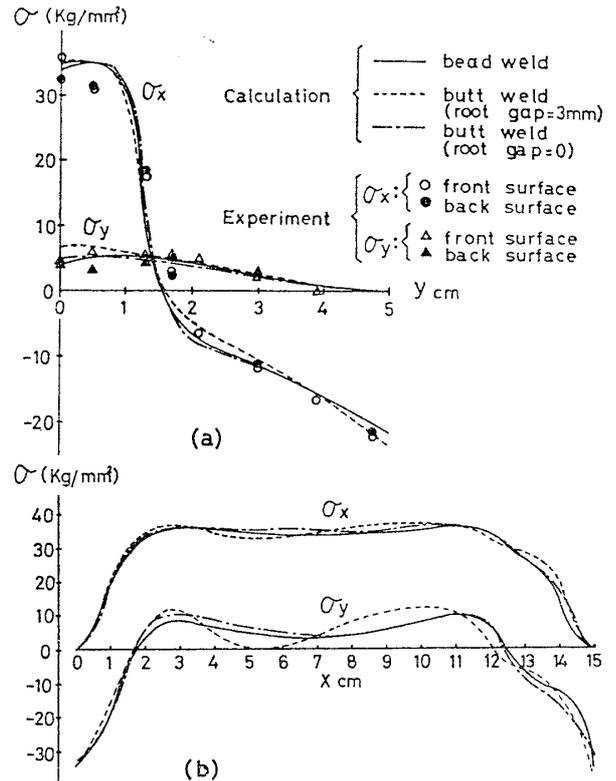


Fig. 15 Residual stress distributions (a) on middle transverse section, (b) on weld centerline

のひずみを計測した。表裏のひずみ計測値を平均して、仮付け溶接に働く溶接線に垂直方向の応力分布を求め、これを積分して得られた力とモーメントを理論計算値と比較した。ルート間隔がない場合の仮付け溶接に働く力の実験値が計算値より低い値を示しているのは、開先面の密着がやや不十分であったことによるものと考えられる。このようなことを考慮すれば、両者はかなりよく一致しているといえる。

Fig. 15(a) は、板の中央横断面上の残留応力 σ_x , σ_y の計算値と、ルート間隔がある場合の実験値を比較したもので、両者はよく一致していることがわかる。(b) 図は、溶接線上の残留応力 σ_x , σ_y の計算値を図示したものである。これらの図から、同一溶接条件のもとでは、開先やルート間隔の有無は、残留応力にほとんど影響を及ぼさないことがわかる。

4 結 論

突合せ溶接継手に生ずる過渡応力ならびに継手の変位挙動を明らかにすることを目的として、有限要素法による溶接時の非定常熱伝導解析ならびに熱弾塑性応力解析を行った。

本解析は、特定の試験片を特定の溶接条件で溶接した場合について行ったものであるが、ここで得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) 突合せ溶接継手に働く過渡応力の大きさと分布を明らかにした。ビード溶接と突合せ溶接では、熱源より後方の応力分布にはほとんど相違がないが、熱源より前方のそれは著しく異なる。熱源前方の溶接線に垂直方向の力は、ビード溶接では溶接中心線を通る縦断面が受けもつものに対して、ルート間隔がある突合せ溶接では、熱源より前方の仮付け溶接のみがこれを負担する。ルート間隔がない突合せ溶接では、熱源前方の開先面は圧縮力を受けもつことができる。

(2) 突合せ継手の仮付け溶接に働く力とモーメントの時間的変化を明らかにした。同一溶接条件でも、仮付け溶接に働く引張力は、ルート間隔がない場合の方があつた場合よりも大きい。モーメントについては、むしろ逆の傾向がみられる。

(3) 突合せ溶接時、ルート間隔がある場合には熱源直前の開先が閉じ、ルート間隔がない場合には熱源前方の開先が開くことを示し、ルート間隔の有無が突合せ溶接継手の回転変形を支配する重要な要因の一つであることを明らかにした。

(4) 突合せ溶接時に生ずる板の変形状態を明らかにした。ルート間隔の有無によって過渡的な板の変形には若干の相違がみられるが、最終的にはいずれの場合にも板の終端側が内側に回転するような残留変形を示し、横収縮量はルート間隔がある場合の方がない場合より若干大きい。

(5) 突合せ継手の仮付け溶接に働く力とモーメントに関する計算値と実験値を比較した結果、両者はかなりよく一致しており、本解析結果の妥当性がある程度確認することができた。

(6) 同一溶接条件のもとでは、開先やルート間隔の有無は残留応力にはほとんど影響を及ぼさない。また、残留応力の計算値と実験値はよく一致した。

この研究は、文部省科学研究費の援助により、九州大学大型計算機センター FACOM-M-190, OSIV/F4 を使用して行われた。また、実験研究にあたり山口喜久次、松本

展寿両助手の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 藤田, 野本: 熱弾塑性問題に関する研究(その1), 日本造船学会論文集, 第130号(1971.12), pp. 183~191.
- 2) 岩城, 増淵: 有限要素法による異方性板の熱弾塑性解析, 日本造船学会論文集, 第130号(1971.12), pp. 193~202.
- 3) 上田, 山川: 有限要素法による熱弾塑性挙動の解析, 溶接学会誌, Vol. 42, No. 6 (1973), pp. 567~577.
- 4) 藤田, 寺井, 松村, 野本: 片面自動溶接における終端割れ防止に関する研究(第2報), 日本造船学会論文集, 第135号(1974.6), pp. 379~391.
- 5) 藤田, 寺井, 松井, 松村, 野本, 大塚: 片面自動溶接における終端割れ防止に関する研究(第3報), 日本造船学会論文集, 第136号(1974.12), pp. 459~465.
- 6) 佐藤, 上田, 前田, 矢田, 神近, 金: 片面溶接における変形と割れに関する研究(第1報), 日本造船学会論文集, 第136号(1974.12), pp. 441~458.
- 7) W. M. Rohsenow, J. P. Hartnett: Handbook of Heat Transfer, McGraw-Hill; 1973, pp. 2.66~2.71.
- 8) E. F. Nippes, W. F. Savage, H. Suzuki, W. H. Chang: A Mathematical Analysis of the Temperature Distribution during Flash Welding, Welding Journal, 34 (1955), 271S~285S. (ただし高温時のデータ3点は著者の私信による).
- 9) 仲: 溶接の収縮と亀裂, 小峰工業出版, 1949, pp. 47.
- 10) 竹内: 熱応力, 日新出版, 1975, pp. 285.
- 11) 辻, 吉村: 薄板のビード溶接時の温度分布と冷却速度, 西部造船会会報, 第58号(1979.8), (印刷中).
- 12) 山田: 塑性・粘弾性, コンピュータによる構造工学講座II-2-A, 培風館, 1972, pp. 83~84.
- 13) 前田, 矢田, 中村, 福沢: エレクトロガス溶接中の熱変形挙動と防止対策, 石川島播磨技報, 第13巻, 第6号(1973.11), pp. 687~695.