

(昭和 31 年 11 月造船協会秋季講演会に於て講演)

溶接順序が収縮及び残留応力に及ぼす影響

(第 3 報 残留応力及びクイチガイ)

正員 工学博士 木 原 博*

正員 工 学 士 松 山 泰**

正員 工 学 士 増 淵 興 一***

正員 小 椋 陽***

Effect of Welding Sequence on Transverse Shrinkage and Residual Stresses

Part III Residual Stress and Dislocation

By Hiroshi Kihara, *Kogakusha, Member*Yutaka Matsuyama, *Kogakusha, Member*Kō-ichi Masubuchi, *Kogakusha, Member*and Yō Ogura, *Member*

Abstract

This report is the third part of serial experiments which are being made to survey the effect of welding sequence on transverse shrinkage and residual stresses. In this report the analysis about the part of residual stress and dislocation through 1st to 4th serieses of experiment are mentioned. The size of specimen and welding conditions for each specimen were already stated in preceding papers.

The measurement of residual stress was performed using electric resistance-wire strain-gauges as shown in Fig. 1. The values of measured strain change and the distribution of residual stress are shown in Fig. 2 and 3, respectively.

The results obtained so far are summarized as follows.

1) When the specimen is welded by one block, the value of transverse stress σ_y is tensile along welding bead, but is compressive in the mother material taking its maximum value in the vicinity of weld and decreasing accordingly with the increase of distance from the weld. The value of longitudinal stress σ_x is also tensile at the center of weld and gradually decreases in accordance with the increase of distance from the center. The maximum value of σ_x is larger than that of σ_y , reaching nearly the value of yield stress of mother material. The value of σ_y increases as the increase of degree of constraint as shown in Fig. 5.

2) When the specimen is welded by two or more blocks, there occurs a fairly different phenomenon. Though the average tendency is nearly the same as that in the case of one block, the distribution of residual stress becomes much complicated on the welding bead as shown in Fig. 3. This phenomenon was observed not only in case of block welding but also in multilayer sequence. Therefore, it seems to be meaningless to attempt to control the residual stresses on

原稿受付. 7 月 15 日

* 東京大学教授

** 播磨造船所

*** 運輸技術研究所

the weld zone by the change of welding sequence.

3) Dislocation occurred by slitting along the weld line was also measured. The form of dislocation is quite similar to that of transverse shrinkage as shown in Fig. 6.

There exist close connections among transverse shrinkage, dislocation and transverse stress. These connections were studied from some viewpoints. For instance, some attempts to estimate the value of σ_y from the transverse shrinkage were tried (Fig. 7 & 8).

1. は し が き

溶接順序が収縮及び残留応力に及ぼす影響について筆者等はある程度系統的な実験を試みている。第1報及び第2報においては横収縮の問題について述べたが、これらの試験片について残留応力及びクイチガイに関する実験を行い、残留応力、クイチガイ、横収縮間の相互関係についての検討を実施したのでその結果について報告する。

2. 実験方法

2.1 試験片の形状及び実験条件

試験片には $1,200 \times 800 \times 19$ mm の鋼板の中央部に長さ 75~500 mm の X 型開先をとつたスリット型拘束試験片を用いた。今回の実験に使用した試験片はすべて横収縮の研究に用いたものであるから、スリットの長さ、溶着順序等については第1報及び第2報を参照されたい。なお試験片は溶接前に応力除去焼鈍を行つたものを用い、溶接に際しては各層とも表裏面交互に溶接を行つて角変形を出来るだけ少なくするようにした。

2.2 残留応力の測定

第1乃至第4系列に属する合計 17 枚の試験片のうち下記 10 枚について残留応力の測定を行つた。

ブロック数が1つでスリット一杯に溶接したもの：試験片 1-6, 2-1, 2-3, 2-4

スリットの中に1つのビードを置いたもの：試験片 3-2, 3-3

2或は3ブロックで溶接したもの：試験片 1-4, 4-1, 4-2, 4-5

これらのうち試験片 3-3 だけには Gunnert 式歪計を用いたが、他は電気抵抗線歪計（1方向ゲージとして K-22, 2方向ゲージとして KR-4, いずれも標点距離 9 mm, 共和無線製）を使用した。

筆者等は同様の試験片に関する残留応力測定を従来から何回か実施しているが、どの場合でもビード上の残留応力はかなり凸凹し、はつきりした曲線が求めにくかつたので今回の実験においてはビード線上について詳しい測定を行うことにした。

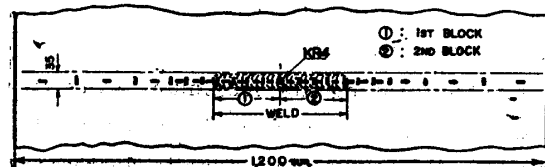


Fig. 1 Method of Strain Measurement (Spec. No. 1-4)

歪計貼布位置の一例は Fig. 1 の如くで、長さ約 150 mm のビードについて縦、横両方向とも各 5 点測定出来る位の間隔に貼布した。この場合ビードの継目や端部などでは一部 2 方向ゲージを使用した。測定は表裏面で実施したが、表裏交互に溶接した関係上表裏面で大体同じ値が得られたので後には片面だけについて測定を行つた。

切断にはドリルを用い図に示す如く幅約 35 mm の帯状のものを切取つてその際の歪変化を測定した¹⁾。Gunnert

式歪計の測定間隔もビード上は約 30 mm とした。

2.3 クイチガイの測定

残留応力のある物体に切断線を入れると応力が一部解放されクイチガイを生ずるが、一部の試験片（1-2, 1-3, 1-5, 4-3）について溶接線に沿つてカッター（幅 3 mm）でスリットを入れた際のクイチガイの測定を行つた。測定の要領は横収縮の場合と同様でコンパレータによつた。クイチガイは理論的にはスリットの両岸に関して考えられるものであるので横収縮とクイチガイとの比較を便ならしめるため標点距離は 45 mm（横収縮の測定に採用）と 8 mm との両者を併用した。またビードの縦収縮がクイチガイに及ぼす影響をしらべるため試験片 1-2 についてはビードにスリットを入れた後ビードと直角方向に櫛状にスリット（長さ約 40 mm）

1) 解放度を高めるため更に横方向に細分しても見たが、あまり好結果がえられなかつた。

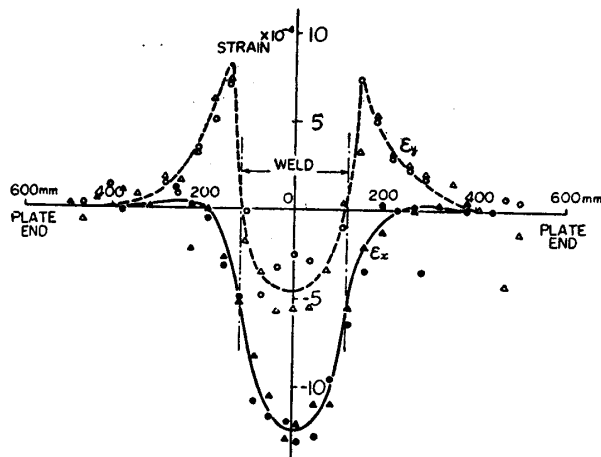
を入れて縦収縮をも解放し、その際のクイチガイの変化をしらべた。

3. 実験結果ならびに解析

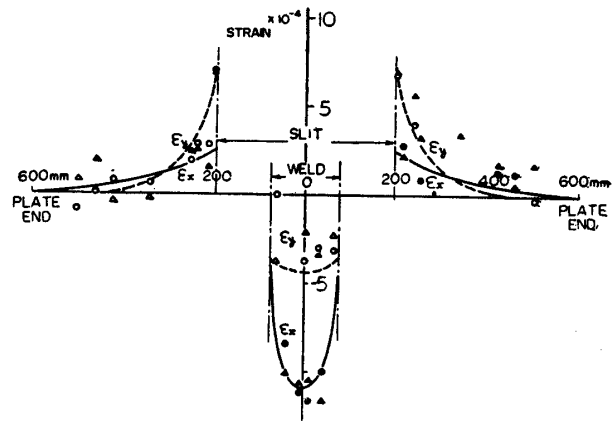
3.1 残留応力

紙数の関係上各試験片に関するデータは省略するが、解放による歪変化及びそれをもとにして求めた応力分布の典型的な例を夫々 Fig. 2 及び 3 に示す。これらの実験結果から大要下記のことが分る。

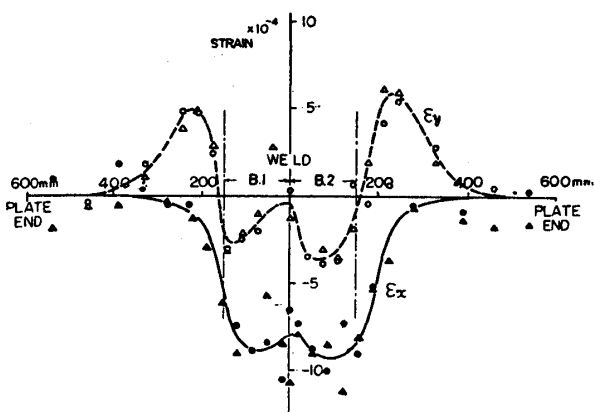
先ずブロック数が1つでスリット一杯に溶接した場合について述べると Fig. 3 (a) に示す如く、溶接線に直角方向の応力（以下 σ_y と略す）は溶接部の中央では高い引張応力で両端に近づく減少するが、溶接の端部から母材に少し入った所で高い圧縮応力を示し、それより遠方では漸次減少して0に近づく。これは横収縮のため溶接部には引張応力が発生し、母材にはそれに対応して圧縮応力が生ずるからと考えられる。溶接線方向の応力（以下 σ_x と略す）は溶接部の中央では高い引張応力を示し、端部に行くに従って減少する。この場合試験片によつては溶接端から母材に少し入った附近で低い圧縮応力を示し、それから0に近づくこともある。溶接部にお



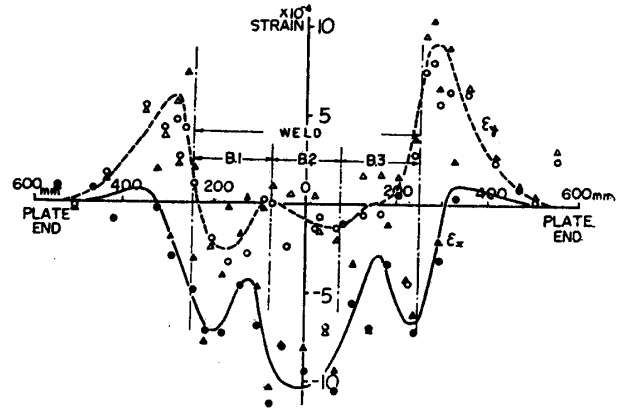
(a) Spec. No. 2—1, welded by one block



(b) Spec. No. 3—2, partially welded by one block



(c) Spec. No. 1—4, welded by two blocks (block welding sequence)



(d) Spec. No. 4—1, welded by three blocks (multilayer sequence)

Fig. 2 Strain Change Due to Relieving

Note : — ● Longitudinal strain at A-surface
▲ " " at B-surface
○ Transverse strain at A-surface
△ " " at B-surface
— Longitudinal strain ϵ_x
--- Transverse strain ϵ_y

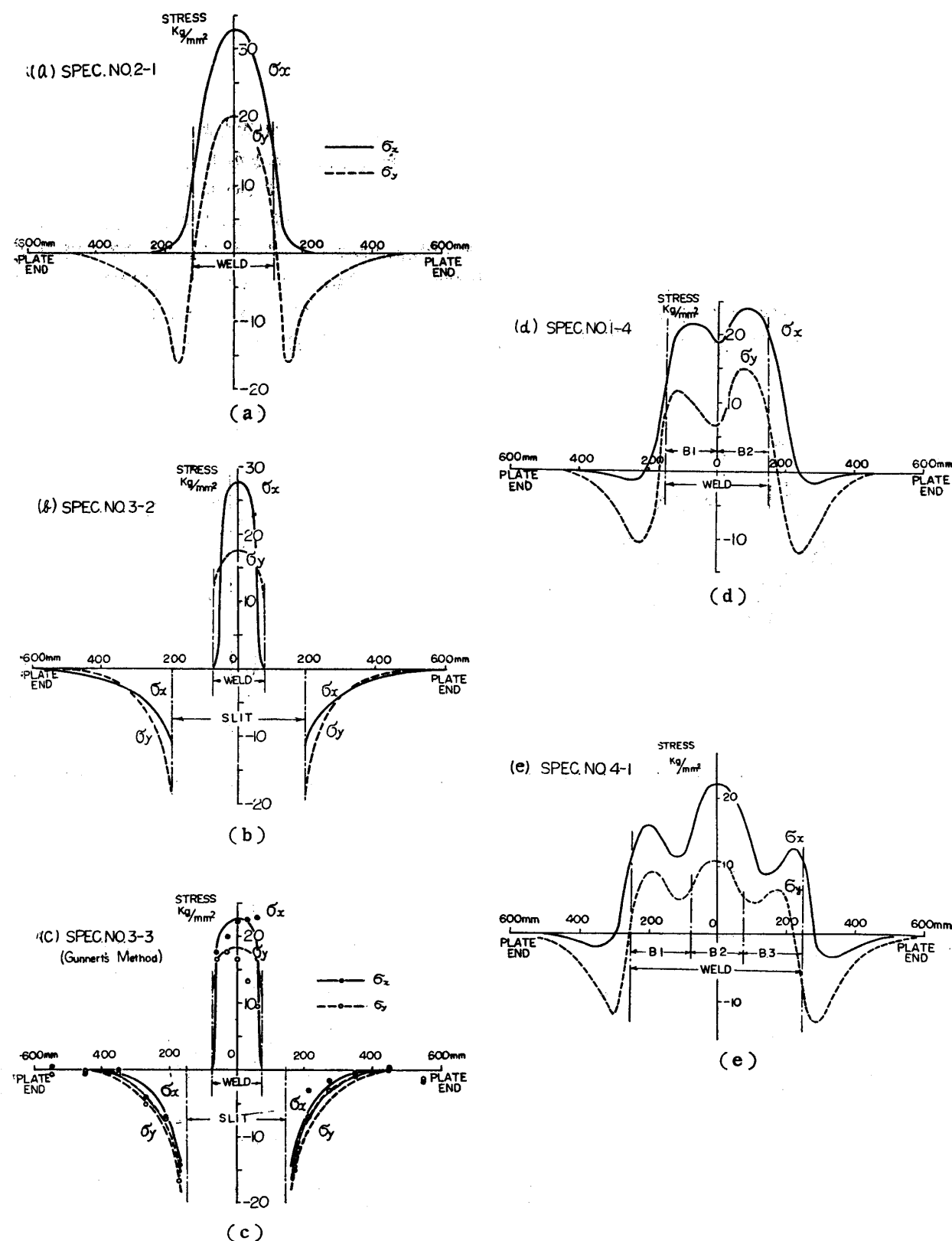


Fig. 3 Stress Distribution

いて σ_x が引張となつてゐるのはビードの縦収縮によるものと考えられる。溶接中央では σ_x , σ_y 共に引張応力であるがその値は σ_x の方が高く、大体降伏点程度になつてゐる。

スリットの中に1つのビードを置いた場合は Fig. 3 (b), (c) の如く σ_x , σ_y 両者とも溶接部は引張、母材部は圧縮で溶接から離れるに従つて減少する。溶接部においては σ_x は σ_y より値が大である。反対に母材部

では σ_x の方が絶対値は小さいようである。従つてビード一杯に溶接したものは σ_x について母材部にかなりの圧縮応力が生ずること以外は大体同じ傾向であるが、この結果は溶接による横収縮及び縦収縮から考えて妥当なものである。試験片 3-3 は Gunnett 式歪計を用いて測定したものであるが、抵抗線歪計による他の測定値（例えば試験片 3-2）と大体類似の結果がえられた。

これに対してブロック数が2つ或は3つの試験片については Fig. 3 (d), (e) に示す如く溶接の端部から少し母材に入つた所で σ_y が圧縮で最大となり、それよりも遠くでは漸次 0 に近づくなど母材部に生じている応力分布の傾向はブロック数が1つものときと大体同じであるが、ビード上の応力分布に関してはかなり特異な結果がえられた。すなわち σ_x, σ_y とも平均的には引張応力を示し、 σ_x の方が σ_y よりも大であることなどはブロック数が1つの場合と同様であるが、測定した歪の値がかなりばらつき滑らかな曲線が求めにくかつた。この場合ブロック法で溶接した試験片（例えば試験片 1-4）だけでなく、全長多層法で溶接した場合（例えば試験片 4-1）でも同様であつた。これは1つビードを置くとその部分には引張、その両側には圧縮といった工合に Fig. 3 (a) 或は 3 (b) に示したような応力が生じ、溶接を次々に行うに伴つて概念的には Fig. 4 に示すような工合に重畳され、複雑な応力分布が形成されて行くからであると考えられる。

この場合1つのブロックについてどの程度の週期になるかは未だよく分らないが、今回の実験やほめ込み溶接に関する実験結果²⁾ などから想像すると溶接棒の継目があるごとに Fig. 4 に示す程度に複雑な形になつている可能性がある。従つて今回の測定においてもビードが2つ以上の試験片に関する値は未だ十分でなく、それを求めるためには更に小型の歪計を使用する必要がある。

溶接順序と残留応力との関係という問題は従来から懸案になつ

ていながら、はつきりした結論はえられなかつたものであるが、上述したような現象もその大きな原因の1つとなつているものと思われる。すなわちこの問題について広範囲な実験を行つた例としては De Garmo³⁾ 及び Weck⁴⁾ の研究があるが、それについて測定法と実験結果とをしらべてみると、前者では1ビード当り約1点の測定（ビード長約7'', 測定間隔約6''）を行つており実験結果は適当な曲線で結んである。これに対して Weck の実験では1ビード当り3~4点の測定（ビード長約6'', 測定間隔約2''）を行つているが、実験結果は非常に凸凹になつていて殆んど傾向が見出せない。また Shepherd⁵⁾ は Weck の実験に関連して“残留応力は施工のちよつとした工合で著しく変化するものであるから施工上これを control することは不可能であると述べているが、今回の実験結果から考えると、ビードを何本か継いだ試験片に関しては粗い測定を行つたのでは殆んど意味がないわけであつて、従来行われていた実験の多くは余り効果のないものであつたと言わざるを得ない。

このようにブロック数が2つ以上になると応力分布が複雑になるためビード上の応力に及ぼす溶着法の差などの影響もはつきり分らなかつたが、単一ブロックの場合については次のようなことが明らかとなつた。

まず σ_y については試験片の拘束度と一定の関係が存在する。すなわち拘束係数 K と溶接中央における σ_y の最大値 σ_{ym} との関係を求めると Fig. 5 の如くで K の増大に伴つて σ_{ym} は増加する。

拘束係数と収縮量との関係についてはすでに第1報で述べたが、拘束係数の定義からするとこれと溶接部に関する収縮量の平均値 $\bar{u}_i$ との積 $K\bar{u}_i$ は σ_y の平均値に相当する量である。そこで Fig. 5 には $K\bar{u}_i$ をもプロットしたが図に示す如く σ_{ym} とほぼ相似の関係がえられる。これは拘束係数、横収縮、 σ_y の間に密接な関係のあることを示すものである。ここで σ_{ym} は $K\bar{u}_i$ よりも値が小さくその約80%であるのでこの図には $K\bar{u}_i$ の80%の曲線を描いた。一方第1報でも述べたように横収縮と拘束係数との間には一定の関係があるから収縮量

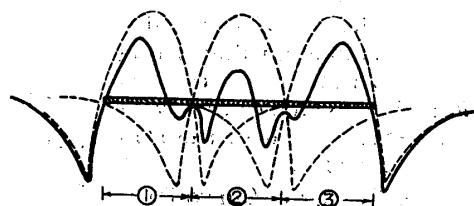


Fig. 4 Schematic Explanation of Complicated Stress Distribution on Welded Bead

Note:

Broken lines: Transverse stress made by each block ①, ② & ③
Full line: Composed stress at the final state

2) 木原・増淵・小椋：造船協会論文集 第100号

3) E. P. De Garmo, J. N. Meriam & F. Jonassen: Weld. Journal, Aug. 1946, Sept. 1946 等

4) R. Weck; Admiralty Ship Weld. Comm., Report No. 4, Jan. 1949

5) R. B. Shepherd; Weld. Journal, Jan. 1954

なお Shepherd は control 出来ないものに residual welding stress と reaction stress とを含めているようであるが、後者については充分 control 出来るものと思う。

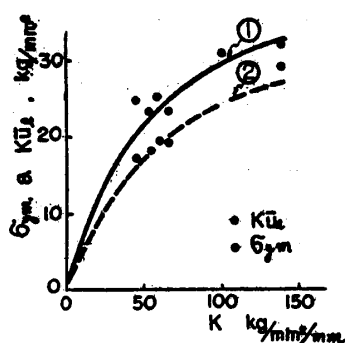


Fig. 5 Effect of Degree of Constraint on Transverse Stress

K: Coefficient of constraint
 σ_{sym} : Maximum value of transverse stress (at center)
 $\bar{u}_t$: Mean value of transverse shrinkage over the range of weld zone

Curve ②=0.80 Curve ①

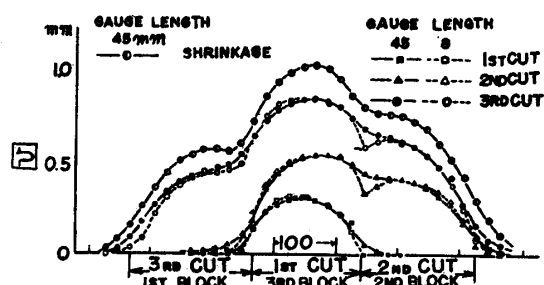
を仲介にして接手の拘束係数から σ_{sym} の値を近似的に推定することが可能である⁶⁾。

σ_s に関しては拘束係数 K との間に一定の関係は見当らない。どちらかと言えば溶接長が影響しているようで、De Garmo 等³⁾ が指摘しているごとく溶接長が長くなると σ_s は大となるのではないと思われるが、はつきりしたことは分らない。

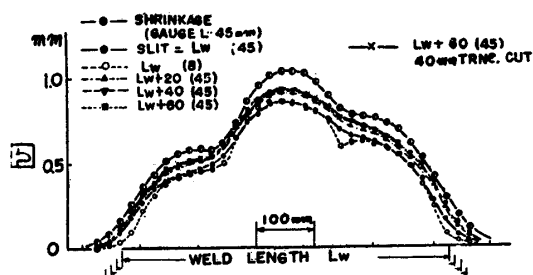
3.2 クイチガイ

溶接後ビードの所にスリットを入れて切断すると切口は拡がってクイチガイを生ずるが、クイチガイの測定結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 (a) は3つのブロックで溶接した試験片1—2について溶接と逆の順序にそのブロックの部分にスリットを入れた時のクイチガイの変化を示したものであつて、これと収縮とを比較すると、クイチガイの形状は収縮と相似であるが、量的には収縮よりやや少ない。この場合標点距離が45mmと8mmのものではその量は殆んど変わらないが、棒の継目及びスリット端部での値が異なっている。すなわち8mmの場合は両端で急に減少するが、45mmの場合では両端での減少は収縮とよく似ている。また棒の継目では8mmの場合は継目でナックルがついているが、45mmではこれがなく収縮と大体相似形を示している。この両端での差は標点距離が長くなつたための減衰の影響であつて8mmの場合の方がスリット兩岸での理論的なクイチガイにより近いものと考えられる。

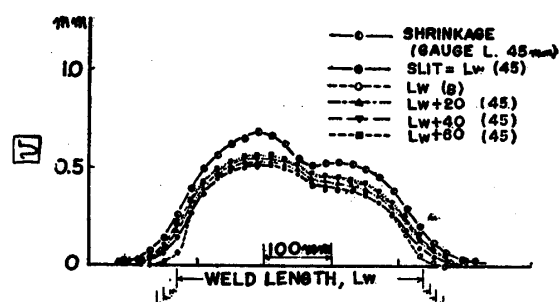
溶接と同じ長さスリットを入れた時のクイチガイは横収縮よりも量が少く約80%程度であるが、スリット長を延長すると Fig. 6 (b), (c) に示す如く増加する。この増加は延長量が40~60mm(両端に各20~30mm)になるとほぼ収斂する。またその程度まで延長したときのクイチガイは初期の収縮量の約85%に達する。更に横方向に櫛状の割りを入れ、縦収縮を解放してもクイチガイは殆んど変化しない。



(a) Change of dislocation due to progressive cutting, Spec. No. 1—2



(b) Change of dislocation due to extending slit length & transverse cut, Spec. No. 1—2



(c) Change of dislocation due to extending slit length Spec. No. 1—5

Fig. 6 Dislocation

6) 第1報において述べた K においてはスリット長としては実験に際して計画した長さをとつたが、実際の長さはこれと多少違つていたので今回の計算に当つては実際の長さを採用した。

溶接線に沿ってスリットを入れた際のクイチガイは弾性的なものと考えられる。従つて溶接線に沿つた残留応力の分布が分つている場合にはそれをもとにしてクイチガイを推定することが可能である。この場合現象は溶接線に関して対称であるからクイチガイの原因としては y 方向の変位型特異点 [7] を考えればよいが、これが実軸上 $(-L/2, 0)$ から $(L/2, 0)$ までの長さ L なる線分上に (1)' 式に示す如くに分布しているときのクイチガイ [8] 及び実軸上の応力 $(\sigma_{x0}, \sigma_{y0}, \tau_{x0})$ は下記の如くにあらわされる⁷⁾。

実軸上 $\frac{L}{2} \geq x \geq -\frac{L}{2}$ 間

$$[6] = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin n\theta \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{y0} = \sigma_{x0} &= \frac{E}{2L} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{nA_n \sin n\theta}{\sin \theta} \\ \tau_{x0} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$[7] = \frac{d[6]}{dx} = -\frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{nA_n \cos n\theta}{\sin \theta} \quad (1')$$

但し $x = \frac{L}{2} \cos \theta$, E : ヤング率

実軸上 $x > \frac{L}{2}$ 及び $x < -\frac{L}{2}$

$$\sigma_{y0} = \sigma_{x0} = \begin{cases} -\frac{E}{2L} \sum_{n=1}^{\infty} nA_n \frac{e^{-n\alpha}}{\sinh \alpha} \cdots \cdots x > \frac{L}{2} \\ \frac{E}{2L} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n nA_n \frac{e^{-n\alpha}}{\sinh \alpha} \cdots \cdots x < -\frac{L}{2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\tau_{x0} = 0$$

但し $x = \frac{L}{2} \cosh \alpha$

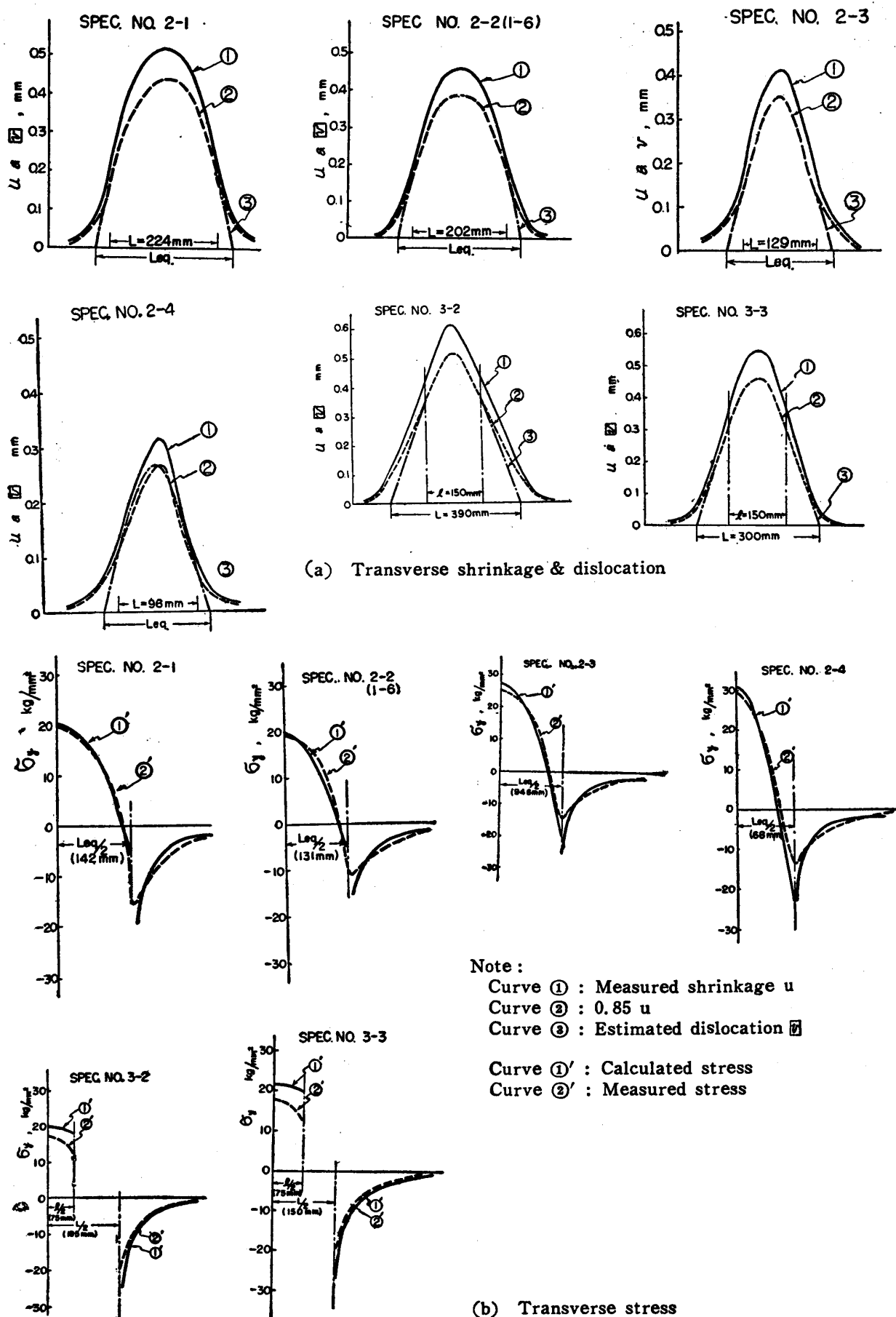
よつてこの関係を利用すれば収縮、クイチガイ、 σ_y の関係を求めることが出来るわけであるが、この場合次のようなことが問題となる。

先ず不適合度の分布している範囲としては溶接部は勿論、その両端の部分でも著しく塑性変形を生じた範囲は含めて考えるのが妥当である。一方実験結果をしらべてみると①残留応力は母材に少し入った所で最大の圧縮応力となつている、②クイチガイについてもスリットの長さを約 60mm 程度延長するとクイチガイはほぼ収斂し、且つまたその値及び形状が溶接時にえられた横収縮と類似のものとなつてくる、などのことから、溶接長より約 60mm 延長したものをもつて不適合度の存在していると考えられる見掛けのスリット長 L_{eq} として計算に用いることにした。

収縮からクイチガイを推定するに当つては収縮の 85% をとり、両端の部分については標点距離 8mm の測定値の場合のように L_{eq} の両端の所で急激に減少するものと考えた。

一方理論式については (2) 式は (1) 式の微分したものに相当しているから実測した σ_y をもとにして [6] を推定することは容易であるが、この反対の操作では高次の項が大きな影響を与え非常に困難である。従つて 2 つ或は 3 つのブロックの場合について実測した収縮から σ_y を推定することは出来なかつたが、1 つのブロックのものについては次のような方法を案出した。すなわち Fig. 3 から分るようにブロックが 1 つの場合の溶接部での応力分布はほぼ 2 次曲線をなすので、これが高々 2 次の曲線であると考えた。また応力分布や収縮の分布を溶接中央に関して対称であると考え、結局 (1)~(3) 式において係数 A_1 及び A_3 以外は全部 0 であるということになる。

このような仮定を設けて実測した収縮から σ_y の分布を推定すると Fig. 7 の如く、実測値と非常に近い値がえられる。図において曲線①は実測した収縮 u 、②はその 85% の曲線、③は②をもとにして描いたクイチガイ [6] の推定値である。これより上述の方法で A_1 、 A_3 を求めて σ_y を計算すると Fig. 7 (b) の実線の如くで、実測値 (破線) とよく一致する。この場合スリット長の短い試験片 2-4 については収縮からクイチガイを推定す

Fig. 7 Method of Estimating Transverse Stress σ_y from Transverse Shrinkage

る際 L_{eq} をスリットより 60mm 長いと考えるのはかなり不自然であるので、延長量を 40mm とした。スリットの一部分だけ溶接した試験片 3-2, 3-3 に関しては溶接した部分には高々 2 次曲線であらわされるような応力が作用し、他の部分は自由であるとして計算を行つた (計算の詳細は紙面の都合上省略する)。またこの場合にはスリット長をそのまま L_{eq} とした。

ブロック数が 2 つ以上の場合には上のような計算方法とはれないが、実測した応力分布からクイチガイを計算すると Fig. 8 の如くで、収縮とはほぼ相似の形状のものがえられるが、計算値は実測した収縮よりかなり小さい。この不一致は実測した応力の値の方に原因があるように思われる。すなわちブロック数が多い場合には著しく変化した応力が発生していると考えられるが、今回の実験のように帯状に切取つた場合にはこれらの変化は十分に測定出来ず、非常に小さな値となつてあらわれて了うからである。 σ_x の方はさきにも述べたように横収縮や拘束度と関係がない。これは σ_x が主としてビードの縦収縮に起因するからである。従つて溶接による残留応力を推定するためには上述の横収縮を基準にするものの他に、ビードの縦収縮をも考慮することが必要であつて現在研究を進めている。この問題については実験的な検討を十分行つていないのでここでは省略するが、ビードの縦収縮を解放してもクイチガイは殆んど変化しないという事実から考えると横収縮、クイチガイ、 σ_y 間の関係を論ずるに当つては縦収縮の影響を無視しても大体差支えないものと思われる⁸⁾。

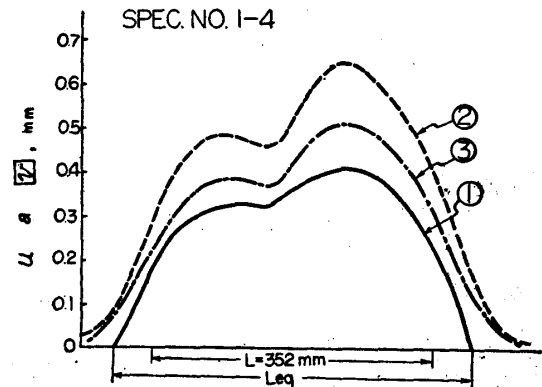


Fig. 8 Comparison Between Calculated Dislocation and Measured Shrinkage
curve 1 : dislocation calculated from σ_y
curve 2 : measured Shrinkage u
curve 3 : $0.85 u$

- 8) 応力やクイチガイに及ぼすビードの縦収縮の影響については現在研究を進めているが、以下にのべるような流体力学における境界層理論と類似の考え方を適用することによつてある程度しらべることが出来る。すなわち無限板の一部に幅 2δ 、長さ L なる細長い空洞があるときその内部にそれより僅かに短いものを充填して両者を無理に接合するという問題を考えてみる。空洞の内外部ではその境界での剪断力 τ_0 を界して応力が伝達される。従つて外部での応力を考えるに際しては細長いスリット状の空洞の縁に τ_0 なる剪断力が加えられた時の応力分布を考えればよい。 τ_0 が (1) 式であらわされるような場合に縁 ($y=0, |x| \leq \frac{L}{2}$) における σ_x 及び σ_y は (2), (3) 式で与えられる (文献 7) 参照)。

$$\tau_0 = \sum_{n=1}^{\infty} n B_n \frac{\cos n\theta}{\sin \theta} \quad (1) \quad \sigma_x = -\frac{3+\nu}{2} \sum_{n=1}^{\infty} n B_n \frac{\sin n\theta}{\sin \theta} \quad (2)$$

$$\sigma_y = \frac{1-\nu}{2} \sum_{n=1}^{\infty} n B_n \frac{\sin n\theta}{\sin \theta} \quad (3) \quad \text{但し} \quad x = \frac{L}{2} \cos \theta$$

またかかる剪断力によってはクイチガイを生ぜず $\varpi=0$ である。次に内部であるがこの部分での応力解析に関しては境界層における同様の簡易化をはかる。すなわち釣合方程式において $\delta \ll L$ なる関係を利用すると $\frac{\partial \sigma_y}{\partial y}$ は $\frac{\partial \sigma_x}{\partial x}$, $\frac{\partial \tau_x}{\partial y}$ に比べて小さく σ_y は y 方向には一定 ($\bar{\sigma}_y$) と考えられる。また σ_x の y 方向での平均値を $\bar{\sigma}_x$ とすると次のような関係が成立する。

$$\frac{d\bar{\sigma}_x}{dx} \cdot dx \cdot \delta + \tau_0 \cdot dx = 0$$

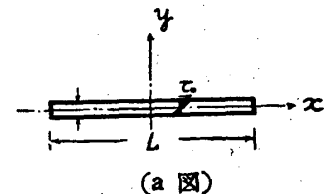
$$\therefore \bar{\sigma}_x = -\frac{1}{\delta} \int_{-L/2}^x \tau_0(x') dx' + \bar{\sigma}_x - \frac{L}{2} = \frac{L}{2\delta} \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin n\theta \quad (4)$$

よつてビード上の応力(ビード幅に対する平均的な) σ_x , σ_y は夫々 (4), (3) 式で与えられる。これと変位型特異点による分を加えると結局ビード上の応力ならびにクイチガイは次式で与えられる。

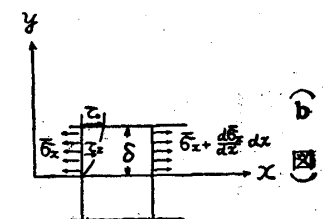
$$\sigma_x = \frac{L}{2\delta} \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin n\theta, \quad \sigma_y = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{E}{2L} A_n + \frac{1-\nu}{2} B_n \right) n \frac{\sin n\theta}{\sin \theta}, \quad \varpi = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin n\theta \quad (5)$$

上式において A_n はクイチガイ(横収縮)による項、 B_n は縦収縮による項と考えられる。ここで 2δ の値はビードの幅にほぼ近い量であるからビード長 L に比較するとはるかに小さく、係数 B_n は σ_x の値の $1/10$ 程度の量となる。また $\frac{1}{2}(1-\nu)=0.35$ であるから、結局ビードの縦収縮によって σ_x の方には相当高い応力が発生していても σ_y には殆んど影響を及ぼさないことが言える。

以上のような仮説を立てればビードの縦収縮は σ_y 及びクイチガイには殆んど影響を与えず、 σ_y に対してはクイチガイ (A_n) が主要な役割を演じていることが一応説明出来る。



(a 図)



(b 図)

筆者らは第1報及び第2報において横収縮の問題を取扱う場合横収縮を弾性的クイチガイと考へて議論を進めてきたが、上述のような関係からかかる考察がほぼ妥当であると言える。ここで拘束係数 K の意義はさきに述べた如く残留応力 σ_r と関係があるが、見掛けの収縮エネルギー U についてはこの値が溶接後溶接部にスリットを入れた場合に解放される歪エネルギーに関連した量であつて、収縮量の 85% をクイチガイと考へればこれから解放される歪エネルギー U_r を求めることが出来る⁹⁾。

4. 溶接順序の影響についての考察

溶接順序を工夫することによつて変形や残留応力を少くしようという目的に対して如何なる溶着法が適切であるかをこれだけの実験から簡単に述べることは困難であるが、現在までに得られた実験結果からは次の如きことが言える。

比較の際の criterion としては先ず第1に溶接完了時におけるビード上の応力の最高値、多軸性などが問題となるが、①全長多層法を用いた場合でも応力分布はブロック毎に激しく振動していること、②多くの場合応力の最高値が大体降伏点近くに達していることなどを考へ合わせると溶着順序を工夫することによつてこれらの値を control しようとしても実際には余り意味がないように思われる。例えば仮りにかなり良い溶接順序があつたとしても、ある部分に補修溶接でも行えばその部分では応力が激しく乱れて了う可能性がある。

一方板全体に生じた歪エネルギー（溶接線に亀裂が入つたと仮定した場合に解放される歪エネルギー）は control することが可能ではなからうか。そしてこの見地からするとブロック法が優れていると考へられる。ブロック法を用いると収縮不整率が大きいから、ビード附近での応力分布は全長多層法に較べて不均一の度合が著しいかも知れないが、全体としての収縮は少いわけであるから溶接部からある程度離れた部分での応力はブロック法の方が低く、そのため歪エネルギーが少くなるものと思われる。

なお溶着順序の影響に関しては歪エネルギーが変化しやすい接手と然らざる接手、言い換えれば溶着順序の影響をうけやすい接手とそうでない接手とがあるように思われる。すなわち一般に残留応力の最も高い部分は溶接部であつて溶接部から離れると応力は漸次低くなるが、一方最も高い溶接部の応力には降伏現象のため自ら上限がある。従つて歪エネルギーが大いに变化するためには溶接部から遠い箇所では応力が中々減衰しないような接手、すなわち大きな reaction stress を生ずるようなものでなければならぬ。例えば自由突合接手、スリット型拘束接手、はめ込み溶接の3者を比較するとこの順序に影響をうけやすくなつていゝと思う。自由接手では reaction stress は存在しない故歪エネルギーは溶接順序によつて余り变化をうけないであらう。スリット型拘束試験片、はめ込み溶接の両者では拘束応力が発生しうが、前者の例では遠方に行く程拘束応力は減衰するのに対し、後者の場合にははめ込まれた板については広範囲に高い応力が存在しう。よつてこの場合には溶接順序によつて歪エネルギーにかなりの差のできる可能性がある。例えばブロック法と全長多層法について U の比較を行うとスリット型拘束試験の場合には全長多層法に対し約 60% であつたが、はめ込み溶接の時は約 45% にまで低下した。これははめ込み溶接においてはブロック法を用いると溶接による収縮の多くが剛体的移動という形になつて現われ、応力となつて蓄積しないのに反し、全長多層法ではこれが蓄積されて行くからである。従つて溶接順序を問題にするには順序によつて残留応力に変化をうけやすい接手か否かを先ず判別する必要があると考へている。

溶接順序選定についての criterion には第1層における亀裂発生の予防ならびに角変形の減少の問題がある。本研究ではこれらに関しては余り力を注がなかつたが、亀裂（拘束亀裂）は σ_r と密接な関係にあるものであるから §4 に述べた方法で検討することが可能ではないかと考へている。

また前述の歪エネルギーに関してはこれを利用することによつて残留応力が脆性破壊に及ぼす影響について以下に述べるような推察を下すことが出来る。すなわち U_r は溶接線に亀裂を生じた際に解放される歪エネルギーに相当する。一方脆性破壊の伝播の問題には屢々 Griffith-Orowan¹⁰⁾ の理論が用いられるが、上述の U_r はこの理論に直ちに應用出来る性質のものである。従つてこの量を利用することによつて残留応力が脆性破壊に及ぼす影

9) 近似的には $U_r = (0.85)^2 U = 0.72 U$ の関係が成立する。また第2報において U の計算に際して端部で収縮と少し異つた形のもの（第2報 Fig. 1 の鎖線）を用いたがこれはクイチガイと収縮との関係について Fig. 6 7 に示すようなことがある程度分つていたから採用したものである。

10) 例えば D. K. Felbeck & E. Orowan; Weld. Journal, Nov. 1955

なおこれらの理論においては通常一様な引張応力が加えられた場合を取扱っているから、その場合問題にされている弾性エネルギーは U_r （或は U ）の第1項のみをとつたことに相当する。

響の問題についてある程度研究を進めることが出来るかも知れない。ちなみに少量的事項をのべると3ブロックで溶接した試験片（スリット長約450mm、板厚19mm）の場合では溶接完了時に蓄えられる U の値は約100kg-mであるから、単位面積当りでは1kg-m/cm²のオーダーになる。一方脆性破壊に関する各種の実験結果から考えると延性破壊の場合には亀裂の進展に要するエネルギーはこれより相当高いが、脆性破壊を生じた場合にはこの程度のオーダーになっている。よつて歪エネルギーの見地からすると延性破壊の場合には残留応力によつて内部に蓄えられていたエネルギーは殆んど問題にならないが、脆性破壊の場合には大体同じオーダーであつて、残留応力のもつエネルギーが破壊の伝播に影響を与える可能性がある。なおこの問題については更に研究を進める所存である。

5. 結 論

今回の実験の結果明らかになつた事項は大要下記の如くである。

1) 溶接部に生ずる残留応力については溶接線に直角方向の応力 σ_y は溶接部では引張であるが、溶接部から少し母材に入つた所で高い圧縮応力となり、それより遠くでは漸次0に近づく、溶接線方向の応力 σ_x は溶接部では引張で両側に行くと漸次減少する。この場合 σ_x 、 σ_y とも溶接の中央部で最大であるが、 σ_x の方が値が大きく、ほぼ母材の降伏点に達している。また σ_y は接手の拘束係数が増大するに伴つて増加する。

2) 以上はブロック数が1つの場合であるが、ブロック数が2つ以上の場合には現象はかなり異なる。すなわち応力の平均的な傾向は大体上述の如くであるが、ビード上の応力分布は著しく凸凹となる。しかもブロック法の場合のみならず全長多層法で溶接した場合でもこのような状況を呈する。従つて2つ以上のブロックで溶接した試験片について簡単な実験を行つた場合の実験結果は余り信頼出来ない。

3) 溶接線に沿つてスリットを入れるとクイチガイを生ずるが、そのクイチガイは横収縮と大体相似の形をもちその量は横収縮より僅かに少なく、スリットの長さを60mm程度まで延長するとクイチガイは横収縮の85%程度にまで達する。従つてこのような接手における横収縮の大部分は弾性的なものである。またビードの縦収縮はクイチガイに殆んど影響を与えない。

横収縮、クイチガイ、 σ_y の間には密接な関係があるが、これらの相互関係について検討を行い、横収縮の実測値から σ_y の値を推定することなどを試みた。

また以上の実験結果をもとにして溶接順序と残留応力との関連について§4に述べるような考察を行つた。すなわちビード上の残留応力はビード1つごとに相当著しく変動するものであるから、これを工作上controlしようとしても殆んど不可能と考えられるが、歪エネルギー U についてはこれをcontrolすることは可能であろう。そして今回実験を行つたような拘束接手にあつてはブロック法を用いた場合の方が U の値は少い。

6. あとがき

本研究を実施するに当り、理論的な面では森口助教授より御懇篤なる指導を拝いだ。実験に際しては西原克典、矢田敏夫、真保義興、堀内勝彦、安達武二、北野正夫氏らの協力をうけ、また井口常雄博士の御好意により井上光、高橋貞氏らの協力をうけることも出来た。更に研究費に関しては運輸省及び日本造船研究協会から補助をうけた。これらの関係諸氏および諸機関に厚く感謝する。