

電氣銲接部の残留内部應力に就て

(第三回工學大會講演)

村田 榮太郎

ON THE RESIDUAL STRESSES IN AN ARC-WELDED JOINT

by Eitaro Murata

SYNOPSIS:—The present writer measured the distribution & the value of residual stresses in an arc-welded joint by Heyn's method, using Zeiss' optimeter, and obtained the following results.

1) The residual stresses parallel to the weld line showed the maximum values at the welded part and at the outer ends, the former being tension, and the latter compression

2) The residual stresses perpendicular to the weld line were maximum at both ends and at the middle of the weld line, the former being compression and the latter tension.

3) The plastic deformation which was induced by welding and was parallel to the weld line, was contraction and elongation at the welded part and at both ends, respectively.

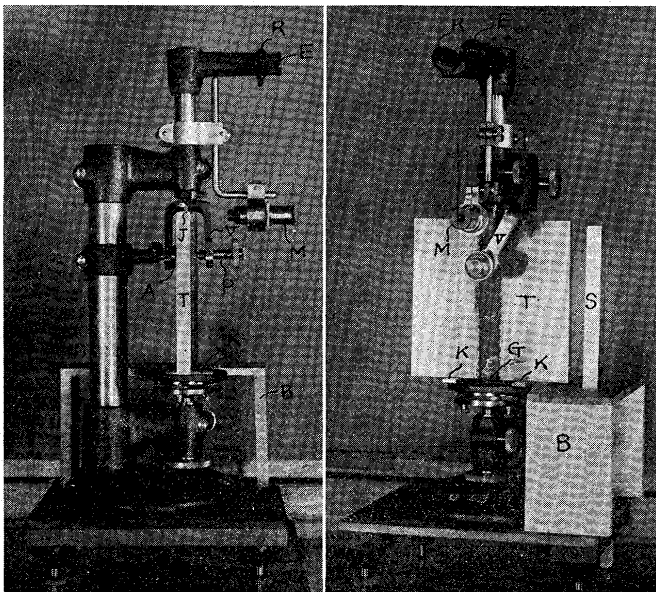
I. 緒 言

銲接部に残留する内部應力は銲接部を有する構造物の設計上其の安全度に相當の影響あるものと考へられる。本研究は或寸法の數個の銲接試片に就いて、之等を夫々銲接線に平行、直角並に厚さの方向に切離し或は少し宛薄き層を削り去りてその長さの變化をツァイス製オプティメーターを以て測定し、この測定値よりハインの方法に倣つて残留内部應力を算出し、その分布曲線を求め、之に就いて些か考察を行つたものである。

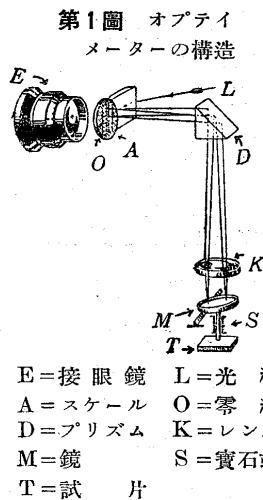
II. 測定装置

長さの變化を測定する爲には寫眞第1、第2及第1圖

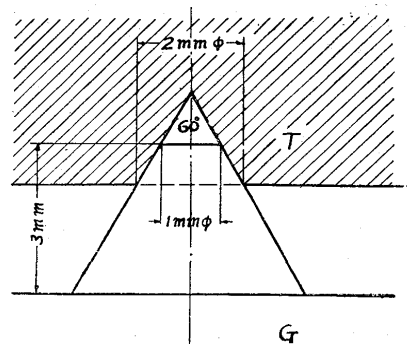
寫眞第1及第2 ツァイス、オプティメーター



R=反射鏡	A=支	へ 臺	E=接
T=試片	J=寶	石 端	S=標
M=顯	K=楔	ち	V=ク
B=試片	P=ね	ぢ	G=圓
			錐支
			へ臺



第2圖 圓錐支持臺 G に載せる試片 T



を函の外に出して測定した。

III. 準備行程

1) 材 料 4'×8'×3/4" の市販の軟鋼板より 130mm×230mm×3/4" の板を剪斷し、その初内力を除く爲に電氣爐を用ゐ 840°C に於て 30 分間焼鈍した。その炭素含有量は檢鏡の結果 0.25% と推定した。

2) 試 片 焼鈍せる材料はシェーパーを用ゐて 200.4 mm×98mm×17mm に總仕上し第 1 表の如き 9 個の試片

の如きオプティメーターを用ゐた。試片 T は第 2 圖の如く圓錐支持臺 G の上に之を載せ、ランプ V を以て垂直に保つた。V は試片の脊面を支へ A に押しつけて居る。支へ A は圓頭を有する 2 個のピンを持ち、ねぢ P も亦圓頭を持ち、内部にスプリングを入れ、試片とピンとの間の壓力を調節し得る様にした。試片はその同一位置を測定する必要上、そ

の表面に垂直線を罫書き、別に取付けた顯微鏡 M のクロスワイヤーと合せる様、楔 K で調節した。

尙全装置は温度の變化少き室に置き且つ硝子張の函に収めたるまゝ、接眼鏡のみ

を作つた。

試片 A は第 3 圖の如く、銲接前その下端面に 10mm の間隔を以て 19 個の小圓錐孔を穿ち、上端面はオブタイメーターに掛け外し得る様傾斜を付け、先づ各圓錐孔の位置に於てその長さを測定し、銲接後再び各位置の長さを測定して銲接に依る長さの變化を測定し得る様にした。

試片 B, J は仕上後銲接し、第 4 圖の如く一側面に 10 個の圓錐孔を穿ち他側面に A と同様傾斜を付けた。

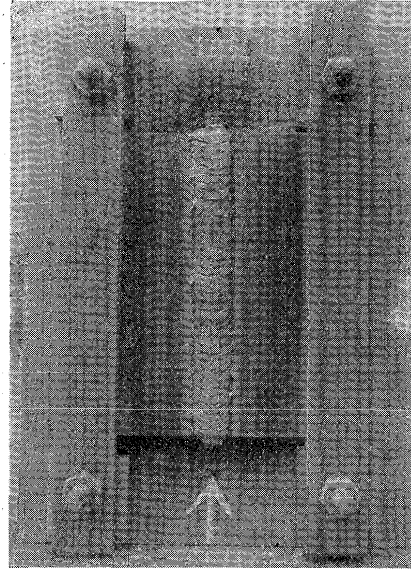
試片 C, D, F, G, H, I は何れも銲接後に圓錐孔と傾斜とを付けた。

長さの標準となる可き標準片は焼鈍材より 200mm×20mm×17mm の大きさに仕上げ銲接試片との比較に供した。

第 1 表 試片の使用目的

試片名稱	V型角度	使用目的
A	60°	(1) 銲接線に平行方向の残留内部應力の測定 (2) 銲接行程に依つて生じたる粘性變形の測定 (銲接線に平行方向)
B	60°	銲接線に直角方向の残留内部應力の測定
C	60°	銲接線に平行なる各部の引張試験
D	60°	(1) 平行方向の應力分布状態の厚き方向に於ける變化
F	60°	A と同じ
G	60°	C と同じ (この結果を F に用ふ)
H	75°	A と同じ
I	75°	C と同じ (この結果を H に用ふ)
J	75°	B と同じ

寫眞 3 銲接臺板に取付けたる試片 A



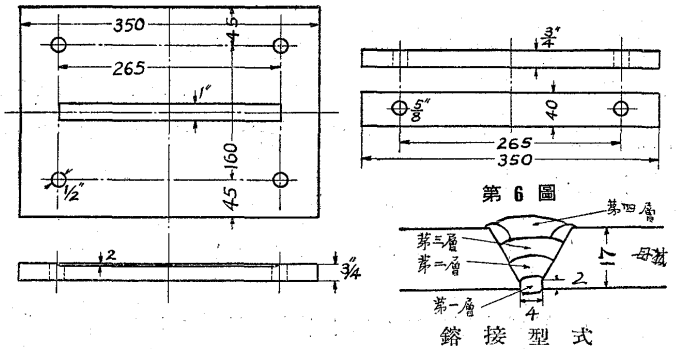
妨げ平面的の變形のみを許す様にした。

試片 A, B, C, D に用ゐたる銲接棒は No.2. M. S. 型で長さ 14" 直径 4.8mm の被覆せるもの又試片 F, G, H, I, J に用ゐたるは帝國酸素製 No.16. で長さ 450mm、直径 5mm の被覆棒である。

銲接型式は第 6 圖

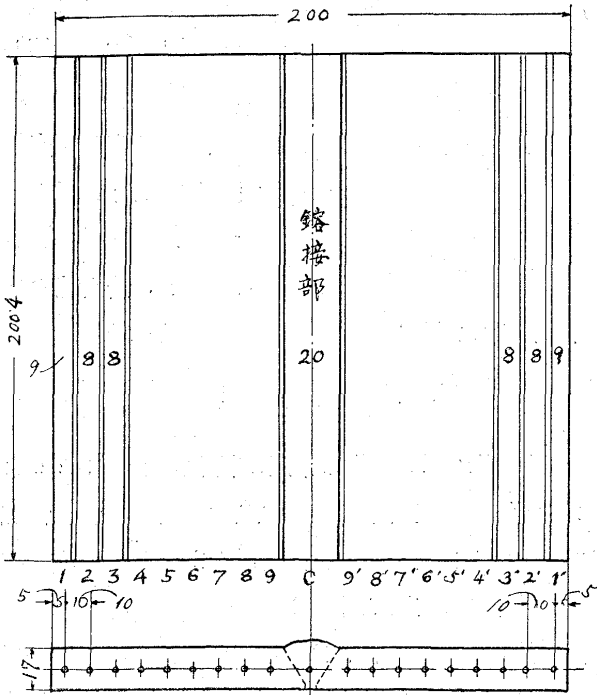
の如く V 型衝合接手で兩端假付の上四層盛を施し V 型角度は試片により第 1 表に示したる如く 60° と 75° にした。

第 5 圖 銲接臺板及押へ金

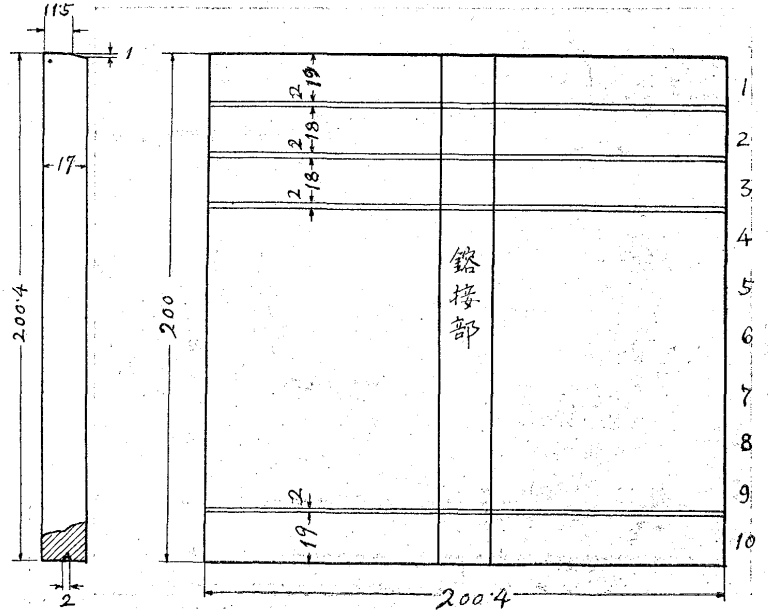


3) 銲接 銲接試片は寫眞第 3 及第 5 圖に示す如く同じ軟鋼板より造りたる銲接臺に取り付け銲接中の曲がりを

第 3 圖 試片 A



第 4 圖 試片 B 及 J



IV. 実験結果並にその考察

1) 溶接線に平行方向の残留内部應力 試片 A を第 3 圖の如く溶接線に平行に 8mm 幅の小片に切離し、各小片の長さの變化を測定し第 2 表の如き結果を得た。この長さの變化より各部の残留内部應力を求める爲には各部の弾性係数 E を求める必要があるので、A と同様の試片 C より第 7 圖と同様の引張試験片を削り出し、之を試験して第 3 表の如き結果を得た。

次に残留内部應力の計算はハインの¹⁾方法に倣ひ次の如く行つた。

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

茲に E=弾性係數

ϵ =歪

一般に

$$\sigma_n = \Delta l \cdot E_n / l \dots \dots \dots (1)$$

茲に Δl =n 番目の小片の切離前後の長さの變化

E_n =n 番目の小片の弾性係數

l=試片の原の長さ=200mm

従つて試片 A の小片 1 に於ては

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= (548/1,000) \times (1/200) \times 19,000 \\ &= 5.21 \text{ kg/mm}^2 \end{aligned}$$

尙 E の値は第 3 表中溶接線の兩側の値の平均値を圓滑曲線にて表し曲線上の點より求めた。

第 2 表 試片 A の實驗結果

n	$\Delta l(1/1000mm)$	n	$\Delta l(1/1000mm)$	n	$\Delta l(1/1000mm)$
1	+ 54.8	8	- 35.0	5'	+ 30.1
2	+ 48.3	9	-107.9	4'	+ 43.9
3	+ 48.2	C	-115.2	3'	+ 49.6
4	+ 40.6	9'	-111.9	2'	+ 50.2
5	+ 38.3	8'	- 17.0	1'	+ 55.6
6	+ 12.9	7'	+ 17.9		
7	- 7.2	6'	+ 29.5		

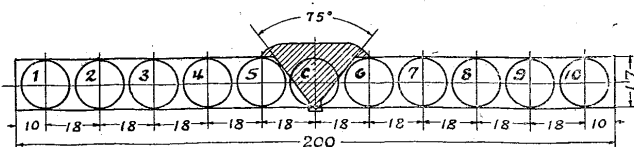
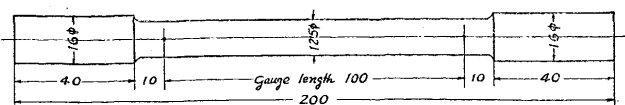
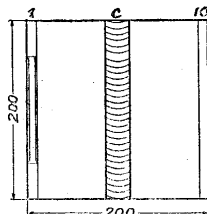
n=小片の番號

Δl =小片の切離前後の長さの變化

第 7 圖

溶接線平行方向の引張試験片及び其の位置 試片 I

單位: mm.



第 3 表 試片 C の引張試験結果

引張試験片の番號	弾性界限 kg/mm^2	引張強さ kg/mm^2	伸び率 %	E kg/mm^2
0-1	26.9	47.3	28.0	19,800
2	25.3	46.7	26.9	21,000
3	26.1	47.6	31.0	23,700
4	24.4	46.5	31.2	—
5	21.2	48.1	26.8	21,050
C	23.6	35.6	1.7	18,100
6	27.7	47.0	22.8	21,050
7	23.6	46.2	26.0	20,900
8	24.4	46.2	30.4	21,900
9	24.4	45.8	27.1	20,500
10	23.6	46.1	26.7	18,750

試片 A の溶接部は第 8 圖に示す如く兩側より 1mm 宛削り去り残つた部分の長さの變化を測定し、この測定値より次の如くして残留内部應力を算出した。

今 l=試片 A の長さ

l_n'' =第 n 層を削り去りたる時残りし部分の長さ

f_n'' =第 n 層を削り去りたる時残りし部分の横斷面積

f_n' =第 n 層の横斷面積

E=弾性係數

$$= 18,000 \text{ kg/mm}^2$$

σ_n' =第 n 層に於ける残留内部應力

σ_n'' =第 n 層を削り去りたる時残りし部分の残留内部應力

とすれば第 1 層より第 7 層迄は

$$\sigma_n' = E/l \cdot \{(l_n'' - l) f_n'' - (l_{n-1} - l) f_{n-1}'\} \cdot 1/f_n' \dots \dots (2)$$

又最後の部分に於ては

$$\sigma = E/l \cdot (l - l_n'') \dots \dots \dots (3)$$

實測値を當嵌めてみると

$$\begin{aligned} \sigma_1' &= E/l \cdot \{(l_1'' - l) f_1'' - (l_0'' - l) f_0'\} \cdot 1/f_1' \\ &= 18,000/200 \cdot \{-118.7 \times 357.3 - (-115.2) \\ &\quad \times 393.8\} \times 1/36.5 \times 1,000 \\ &= 7.3 \text{ kg/mm}^2 \end{aligned}$$

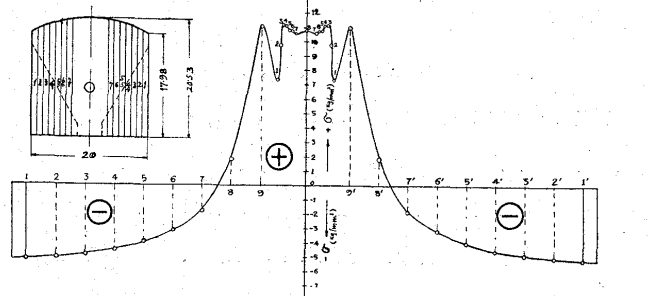
$$\begin{aligned} \sigma_2' &= 18,000/200 \cdot \{-120.0 \times 319.8 - (-118.7) \\ &\quad \times 357.3\} \times 1/37.5 \times 1,000 \\ &= 9.7 \text{ kg/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma &= E/l \cdot (l - l_n'') \\ &= 18,000/200 \cdot 119.2/1,000 \\ &= 10.73 \text{ kg/mm}^2 \end{aligned}$$

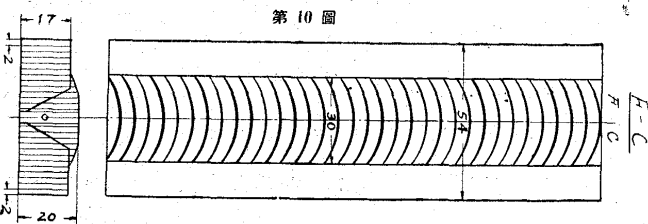
かくて求めたる残留内部應力を分布曲線に示せば第 9 圖の如くなる。この圖は溶接線の左右兩側の計算値の平均である。(以下同様)

尚銲接部附近の分布状態を更に吟味する爲に試片 F を用ゐて第 10 圖の如く銲接部を幅 54mm に残して行つた實驗の結果は第 4 表及第 5 表の如くなつた。この際必要な E の値は試片 G より求め、第 11 圖の如き結果を得た。又之等より残留内部應力を算出して第 12 圖の如き分布曲線を得た。又 75°V 型衝合接手の場合は試片 I を用ゐて第 13 圖の如き引張試験結果を得、試片 H を用ゐて第 14 圖の如き分布曲線を得た。

第 8 圖 試片 A の銲接殘片



第 9 圖 銲接線に平行方向の残留内部應力分布曲線



試片 F の銲接部殘

第 4 表 試片 F 切離前後の長さ變化 Δl

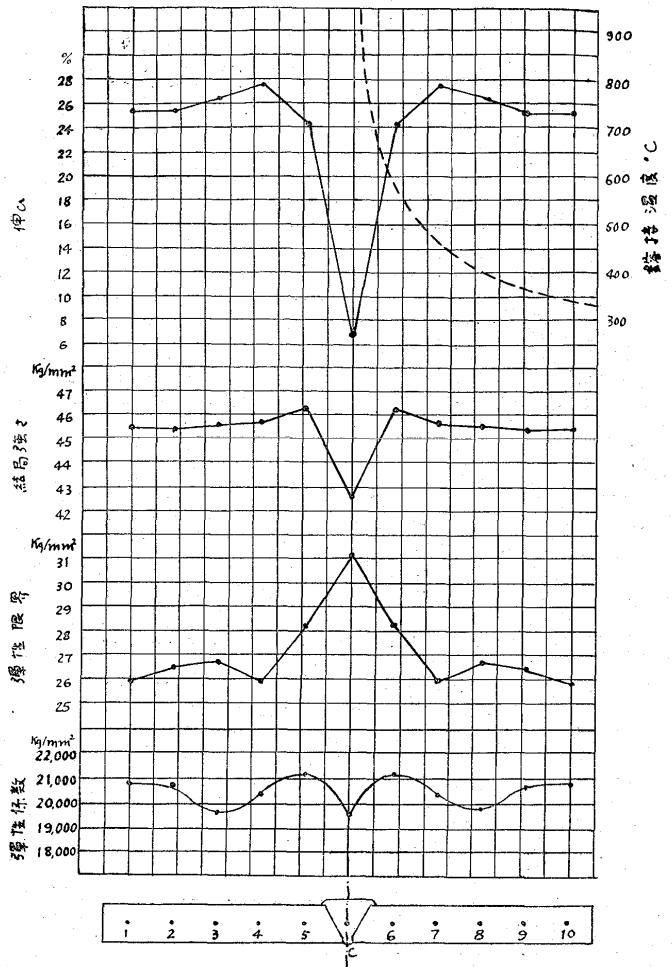
位置	Δl ^{10⁻³mm} (平均)	位置	Δl ^{10⁻³mm} (平均)	位置	Δl ^{10⁻³mm} (平均)
1	-44.9	6	-5.7	5'	-18.8
2	-44.6	7	+10.4	4'	-32.4
3	-34.6	C	+97.2	3'	-34.6
4	-32.4	7'	+10.4	2'	-44.6
5	-18.8	6'	-5.7	1'	-44.9

第 5 表 試片 F 銲接部切削による長さ變化 Δl

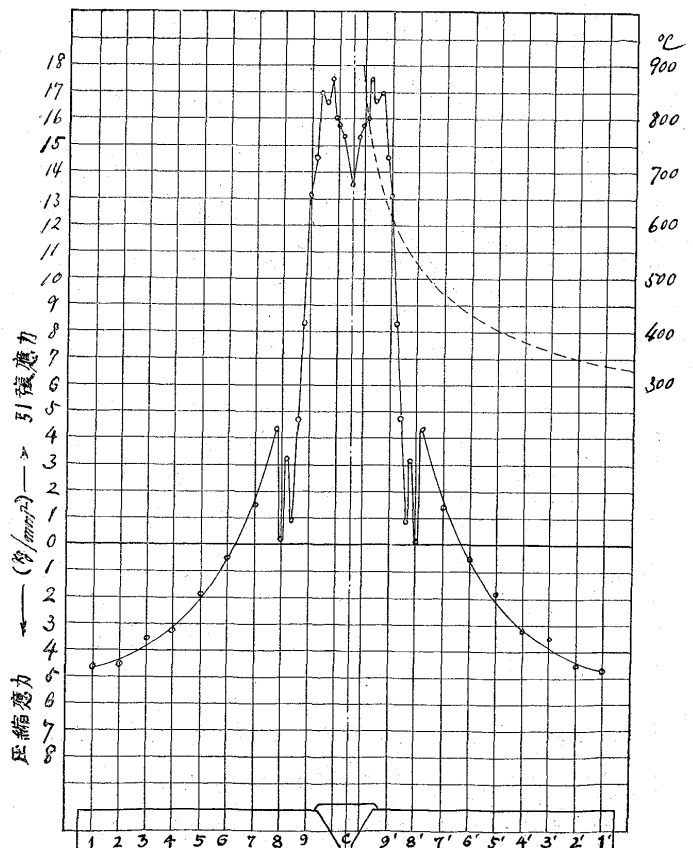
層番號 n	Δl 10 ⁻³ mm	Δl(修正値) 10 ⁻³ mm	層番號 n	Δl 10 ⁻³ mm	Δl(修正値) 10 ⁻³ mm
0	-103.5	-103.5	8	-157.2	-157.2
1	-103.8	-108.0	9	-155.2	-155.2
2	-116.5	-116.5	10	-153.3	-153.3
3	-124.0	-124.0	11	-146.0	-146.0
4	-132.0	-135.0	12	-138.1	-138.1
5	-144.0	-144.0	13	-131.9	-131.9
6	-151.6	-151.6	14	-131.9	-131.9
7	-154.9	-154.9			

今試片 F の残留内部應力分布曲線第 12 圖に就て考察してみると、先づ兩端に於て約 5kg/mm² の壓縮應力を持ち中央に向つて其の値を減じ、中央より約 40mm の點で零となり、更に中央に向つて引張應力と變じ、中央より約 20~25mm の位置に於て相當量を減じ再び中央に向つて増加し補強盛の端より稍中心に近き位置に約 17.5kg/mm² の

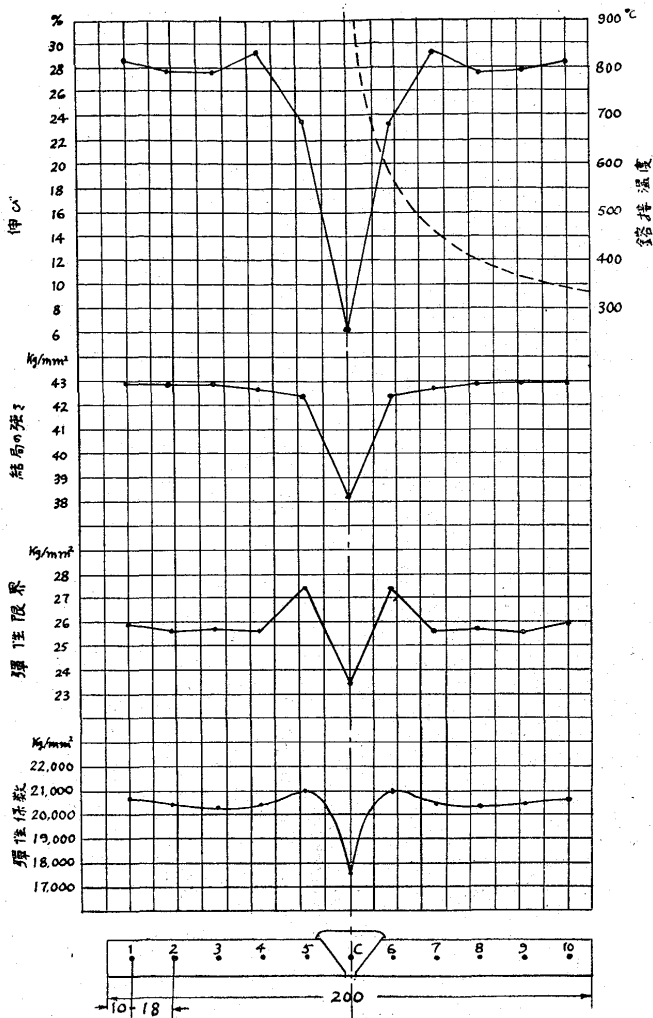
第 11 圖 試片 G の引張試験結果 V-60°(G-試験片)



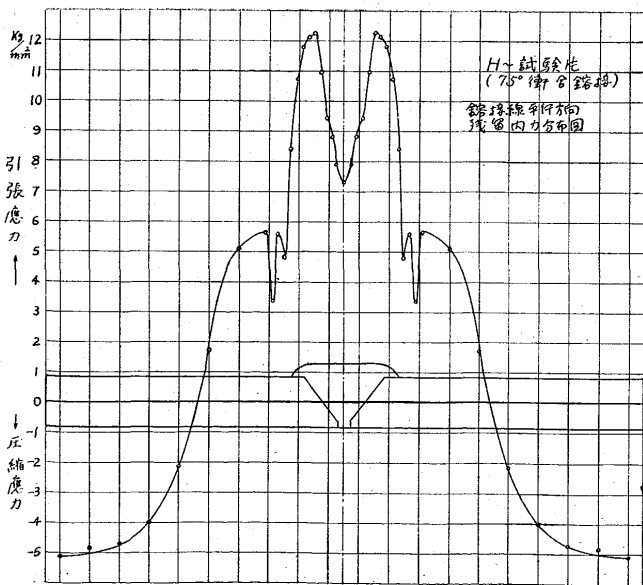
第 12 圖 試片 F の残留内部應力分布曲線、平行方向; 60°V 型)



第 13 圖 試片 I の引張試験結果 V-75° I-試験片)



第 14 圖



最大値を示し之より中心線に向つて再び減少し中心線の位置に於て 13.5 kg/mm^2 の最小點を示して居る。

一般に溶接せる板の残留内部應力は溶接部が最も遅く常

温に達する故を以て此所に引張應力を示し、溶接部より遠ざかるに従ひその大きさを減じ遂に壓縮應力となる事は衆知の現象であるが溶接部中心に引張應力の最小點を示す理由は次の如く考へられる。即溶接部附近の温度は溶接直後より常温に冷却する間補強盛の端に近き位置まで大體等しき温度を持ち温度勾配がないがこの位置より両端に向つては相當の温度勾配を持ちて冷却するものと考へられる。第 12 圖の點線は横田清義氏²⁾の研究されし溶接温度勾配を示すものであつて試片の厚さ及溶接條件等は多少異なるが大體の傾向を知る事が出来る。又ゲーリンク氏³⁾も同様の曲線を示して居る。

さて上述の如く溶接部附近の温度勾配が零で中心線より或距離の位置を境として両端に向つて温度勾配があるとすればこの境界線に於て最大の引張應力を示し、夫より中心に向つては應力の大きさを減ずるのが當然である。現にグリーンク氏⁴⁾の理論的解析の結果に依れば溶接部附近の温度勾配を零とした場合には溶接部中心に向つて應力の減少する事が示されて居る。

次に溶接部中心線より $20 \sim 25 \text{ mm}$ の位置に於ける最小點(この部分を假りに W 部と名付ける)に就ては次の理由に依るものと考へられる。即井口武英氏⁵⁾の研究に依れば 0.3% 炭素鋼の高温度に於ける引張試験に於て伸び率は常温より温度上昇と共に減じて 200°C 附近で最小値を示し更に温度上昇と共に 700°C 附近迄増加して居る。又引張強さは 100°C 附近に最小値 300°C 附近に最大値を示し 750°C 附近迄漸減して居る。又河合匡氏⁶⁾はこの理由を變形硬化と變形後の時効作用が相次いで起る爲であると結論されて居る。

又鐵及鋼の高温度に於ける引張試験に於て荷物伸び曲線上の鋸齒状不連続線の原因は降伏作用と時効作用とが相次いで生ずるによると説明されて居る。

さて本實驗に於て試片の溶接作業中その開始より常温に冷却し終る迄の間に溶接部より両端に及ぶ中間の或位置に於てはその位置の温度が上記變形硬化と時効作用を相次いで生じ易い温度範圍に達した時には隣接せる左右兩部分に比較してこの部分の粘性的變形は少いものと考へられるによつて W 部の如く残留内部應力曲線に最小點を示すものと思はれる。尙前述の横田清義氏²⁾の研究になる衝撃應力分布圖の脆性部はこの W 部に相當するものと思ふ。

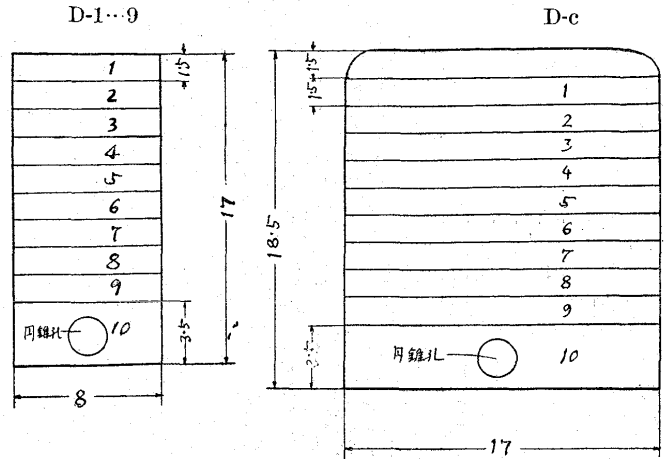
次に第 14 圖 75°V 型の場合には補強盛の幅が廣い爲に最大引張應力の位置は中心線より稍遠ざかり且つ中心の

最小點は比較的低くなつて居る。又この場合も W 部に最小點を示して居る。尙第 9 圖に於て中心の最小點が餘り低くないのは第 12 圖の場合よりも補強盛の幅が狭かつた爲と思はれる。又同圖に於て W 部に相當する最小點が中心線に近い距離に示されて居るのは測定方法が不適當であつた爲であつて第 12 圖即試片 F の如く銲接部殘片を幅廣く採つて薄層に削り去りつゝ測定したならば第 9 圖 8~9 及 8'~9' の中間あたりに最小點を見出したものと思はれる。

2) 銲接線に平行方向の残留内部應力分布状態の板の厚さ方向に於ける變化 試片 D を試片 A と同様に切離し、その切離前後の長さの變化より求めたる残留内部應力分布曲線は試片 A の場合と同様であつたが、この切離小片を第 16 圖の如く厚さの方向に 1.5mm 宛削り去り残つた部分の長さの變化を試片の脊面に近き圖示の點に於て測定した結果は第 6 表の如くなつた。この長さの變化を (2)、(3) 式に適用して第 7 表の如き結果を得た。今この結果を第 17 圖の如く表せば銲接線に平行方向の残留内部應力の分布状態が板の厚さの方向に如何に變化するかを知る事が出来る。即最大引張應力は試片の上面の方が大で第 1 層目の中央は測定出来なかつたが、第 2 層目に於ては約

19kg/mm² を示して居る。又餘り明瞭ではないが W 部も認める事が出来て然も上面より下面に及ぶに従ひ中心線に近づいて居る傾向が見られる。

第 16 圖 試片 D の切離小片



3) 銲接線に直角方向の残留内部應力 試片 B を第 4 圖の如く銲接線に直角に幅 18mm の小片に切離し、その切離前後の長さの變化を測定し第 8 表の如き結果を得た。又之等 10 個の小片より第 18 圖の如く引張試験片を削り出し之を試験して第 9 表の如き結果を得た。之等の値を (1) 式に適用して第 19 圖の如き應力分布曲線を得た。

又試片 J は 75°V 型と同様の實驗を行ひ第 20 圖の如き應力分布曲線を得た。

第 6 表 試片 D の切離小片を更に薄く削り去つた時の長さの變化

n	Δl									
	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-C
0	+ 46.1	+ 46.2	+ 47.4	+ 44.7	+ 36.8	+ 39.4	+ 26.9	- 4.2	- 77.6	-134.9
1	+ 45.2	+ 54.3	+ 48.1	+ 43.9	+ 38.2	+ 33.8	+ 13.6	- 4.1	- 73.4	-131.4
2	+ 47.4	+ 57.2	+ 52.1	+ 50.6	+ 36.7	+ 46.9	+ 17.0	- 0.4	- 68.5	-114.2
3	+ 44.2	+ 50.2	+ 50.8	+ 47.2	+ 35.1	+ 46.5	+ 16.0	- 5.4	- 68.4	-109.1
4	+ 46.0	+ 52.5	-	-	-	+ 40.5	+ 16.0	- 6.4	- 74.4	-102.1
5	+ 59.3	+ 54.3	+ 49.1	+ 48.3	+ 36.8	+ 40.6	+ 25.6	- 6.2	- 74.3	-104.2
6	+ 49.3	+ 51.7	+ 51.3	+ 49.1	+ 41.7	+ 49.4	+ 17.2	- 3.0	- 71.1	-111.8
7	+ 48.0	+ 60.2	+ 52.9	+ 52.0	+ 40.5	+ 47.8	+ 18.3	0	- 74.6	-104.3
8	+ 47.3	+ 51.9	+ 53.1	+ 51.1	+ 41.7	+ 46.5	+ 26.2	+ 0.5	- 72.5	-108.1
9	+ 49.0	+ 53.1	+ 48.8	+ 48.3	+ 39.4	+ 48.1	+ 57.4	+ 2.6	- 78.4	-105.7

第 7 表 試片 D の切離小片を更に削去つた薄層に存在せし残留内部應力

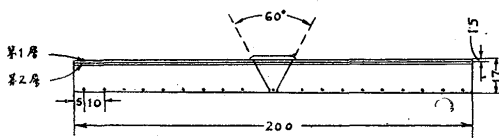
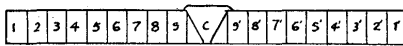
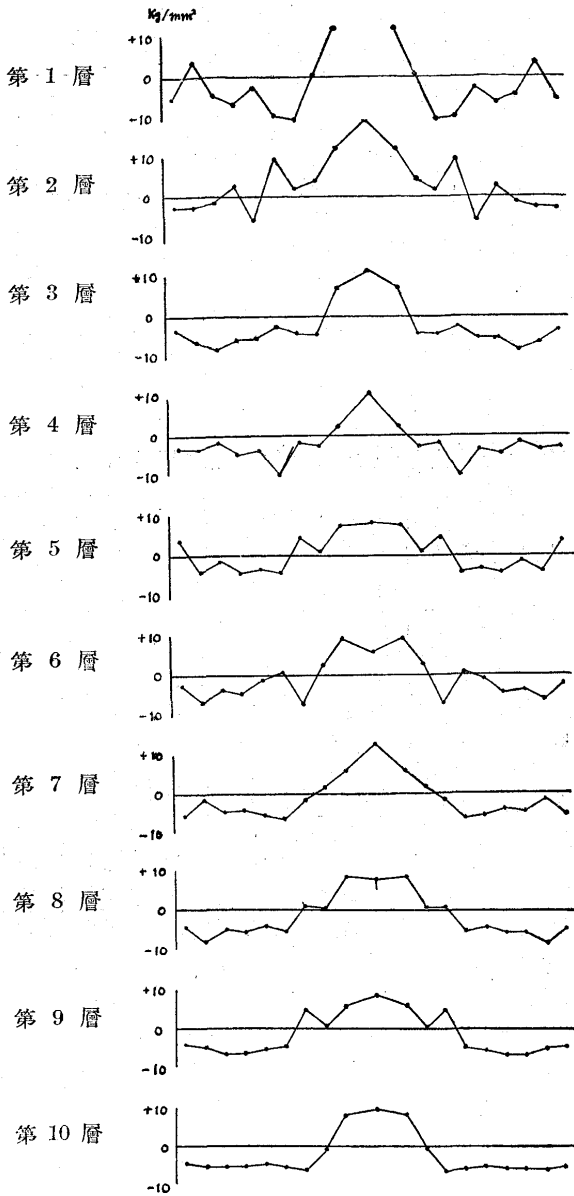
n	σ									
	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	D-9	D-C
1	- 5.27	+ 3.71	- 4.14	- 6.63	- 2.36	- 9.70	- 1.03	+ 0.55	+12.32	+16.40
2	- 2.81	- 2.69	- 1.13	+ 2.92	- 5.94	+ 9.65	+ 1.98	+ 4.06	+12.15	+19.41
3	- 7.02	- 3.18	- 6.47	- 8.54	- 5.71	- 5.48	- 2.65	- 4.24	+ 7.07	+11.35
4	- 2.94	- 3.30	-	-	-	- 9.87	- 1.67	- 6.23	+ 2.30	+10.90
5	+ 3.62	- 4.07	- 1.52	- 4.74	- 3.38	- 4.34	+ 4.50	+ 0.81	+ 7.05	+ 7.78
6	- 2.73	- 6.75	- 3.86	- 4.87	- 1.22	+ 6.69	- 7.17	+ 2.45	+ 9.32	+ 5.84
7	- 5.27	- 1.47	- 4.67	- 3.96	- 5.35	- 6.14	- 1.30	+ 1.68	+ 5.71	+12.96
8	- 4.79	- 8.68	- 5.35	- 5.95	- 4.17	- 5.68	+ 0.84	+ 0.18	+ 8.33	+ 7.81
9	- 4.12	- 4.86	- 6.52	- 6.25	- 5.31	- 4.66	+ 4.87	+ 0.39	+ 5.99	+ 8.15
10	- 4.65	- 5.26	- 5.03	- 5.23	- 4.48	- 5.25	- 6.01	- 0.27	+ 8.00	+ 9.57

之等の分布曲線を見るに何れも銲接の始終端に於て夫々 10~9 及 5~6kg/mm² の壓縮内部應力を示し中央より些か終端に片よつて約 5~6kg/mm² の最大引張内部應力を示しその間の應力は漸次變化して居る。

さて銲接後試片が常溫に達するには銲接の出發端が最も早く終端之に次ぎ中央部より稍終端に近き部分が最も遅き爲圖示の如き分布曲線を示すものと考へられる。

4) 銲接作業に依つて試片の銲接線に平行方向に生じたる粘性的變形 銲接作業の前後に於ける試片 A の銲接線に平行方向の長さは第 21 圖の如く凡て收縮して居る。その收縮量は兩

第 17 圖 D-試験片各層の残留内部應力分布圖



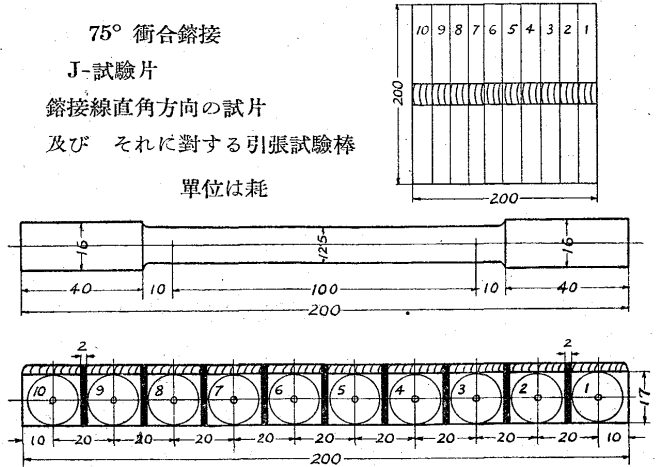
第 8 表 試片 B の 實驗結果

Δl ($1/1000mm$)	E (kg/mm^2)	σ (kg/mm^2)	Δl ($1/1000mm$)	E (kg/mm^2)	σ (kg/mm^2)
1 + 44.2	21,100	- 4.66	6 - 34.2	22,850	+ 3.91
2 + 42.3	21,350	- 4.51	7 - 34.0	20,800	+ 3.54
3 - 12.1	20,000	+ 1.21	8 - 14.7	22,200	+ 1.63
4 - 35.4	21,000	+ 3.72	9 + 26.9	21,900	- 2.94
5 - 42.9	21,050	+ 4.51	10 + 73.3	21,000	- 7.70

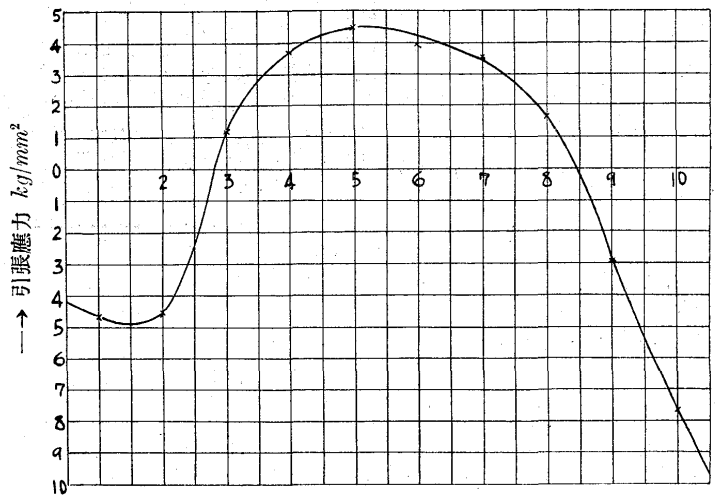
第 9 表 試片 B の 引張試驗結果

試片 番號	弾性界限 (kg/mm^2)	引張強さ (kg/mm^2)	E (kg/mm^2)	試片 番號	弾性界限 (kg/mm^2)	引張強さ (kg/mm^2)	E (kg/mm^2)
B-1	24.5	37.4	19,000	B-6	28.5	35.3	22,250
2	24.5	36.6	21,600	7	27.7	36.3	20,400
3	27.7	39.0	20,000	8	28.5	35.9	22,800
4	27.7	35.6	21,200	9	24.5	37.0	22,050
5	27.7	37.2	21,200	10	22.8	26.6	20,500

第 18 圖



第 19 圖 銲接線二直角方向の残留内部應力分布圖

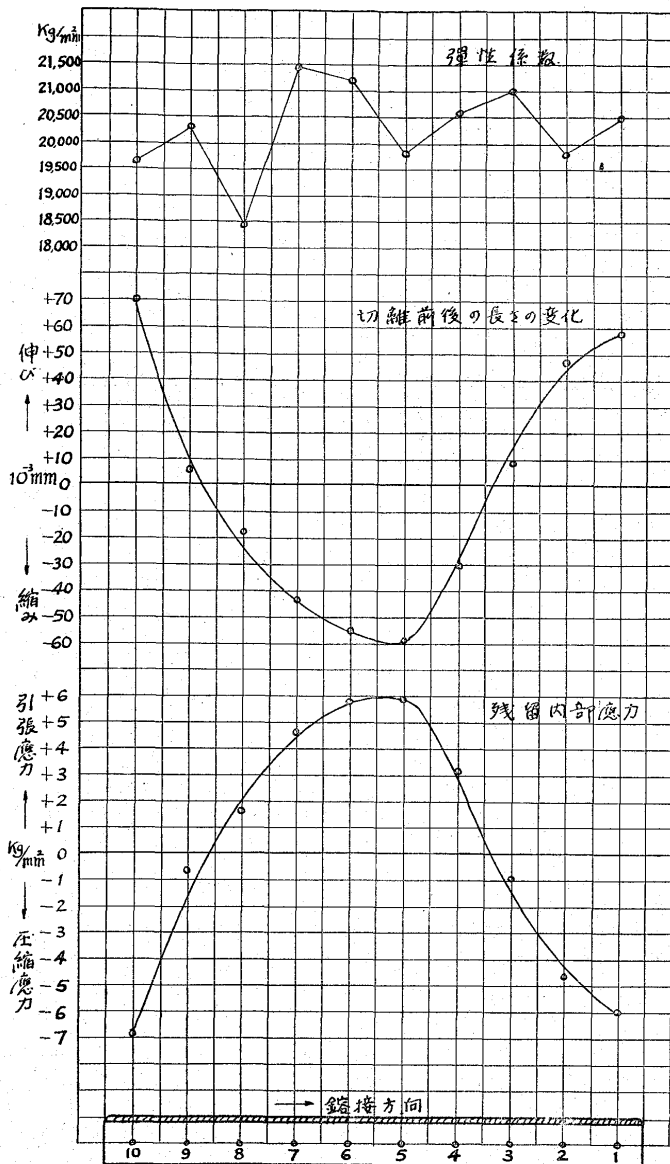


側から各 50mm の距離迄は約 0.045mm であるが 50mm の邊より増加して中央から 15mm の邊で約 0.08mm になつて居る。この第 21 圖は粘性的變形と弾性的變形との和であつて、第 2 表は弾性的變形のみを示すものであるから兩者の差を取れば第 22 圖の如く銲接作業によつて生じたる粘性的變形の分布曲線が得られる。

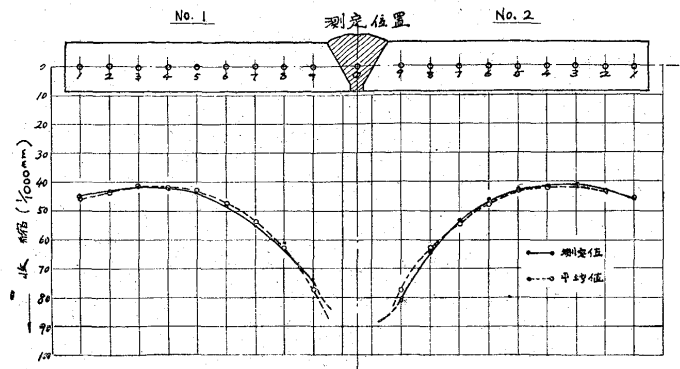
V 結 語

本實驗中試片 A, B, C, 及 D の前半は内藤多伸博士の『銲接接手の細部構造に關する研究』の一部として日本學術振興會より援助を賜り、その實驗に就ては鈴木學及茂貫節夫兩博士の勞に依るものである。又試片 E, F, G, H, I, J 又 D の後半の實驗に就ては鎌村一、寶賀伸太郎、安田義昌三工學士の勞によるものである。最後に日本學術振興會並に上記の諸賢及種々の便宜を與へられた早稻田大學理工學部の諸賢に厚く感謝の意を表する次第である。

第 20 圖 試片 J (75°V 型)



第 21 圖 熔接前後の變化 (平行方向) 試片 (No. 1~2)



第 22 圖 溶接作業に依つて生じたる粘性變形 (試片 A)

