

# 溶接と残留応力

大阪大学・工学部 山口 常 昭

## 1. はじめに

溶接技術の発達にともなつて、溶接の応用範囲は近年急に拡大し、船舶・橋梁・車輛・建築をはじめ各分野に用いられている。

溶接の利用は、材料の軽減、鋸接に比べて工数の減少、構造の連結性、設計の自由度の増加などきわめてうるところが多い。しかしながら、溶接はすでに明日なように、その工作過程に局部的な加熱・冷却過程をふくむものであるため、溶接による残留応力の生成はさけることの出来ないものである。

したがつて、この残留応力の実態を把握することは、溶接構造物の設計、工作法の選定の上にきわめて重要なことである。よつて本文においては残応力の発生機構、代表的な構造における分布の実態、残留応力の影響の概略について述べ、さらに残応力に対する考え方についてふれようと思う。

## 2. 溶接残留応力の発生機構

### 2.1 溶接残留応力の分類

溶接残留応力は一般には2つに大別されている。まず第一は周辺自由な溶接接手にも存在する残留応力で狭義の Residual Stress あるいは内的拘束による残留応力と云われるものである。これは溶接に際して溶接部およびその近傍の部分に高温で発生する塑性変形、変態による局部的な体積変化、あるいは溶着金属自体の冷却による収縮などによつて生ずるものである。

次は溶接接手がその周辺で収縮あるいは膨脹を拘束されることによつて生ずるもので外的拘束による残留応力あるいは Locked-in-Stress というものである。

### 2.2 溶接残留応力の発生機構

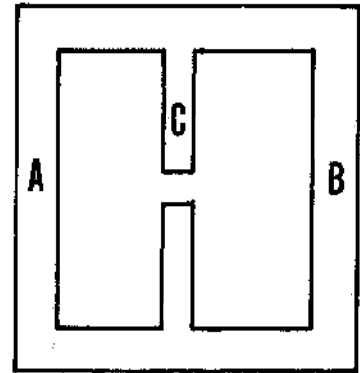
第1図に示すようなA, B, C 3本の細長い部分がその両端で結合せられ、中央C部材の溶接接手を溶接する場合について考えてみる。

もしC部材が単独で溶接される場合には、部材が細長いからその両端が自由に膨脹・収縮するため残留応力は発生しない。

しかし第1図に示すような場合、その加熱冷却中の各部材の変形は次のようになる。まず溶接時にはC部材の継手の近傍は温度上昇のため膨脹する。C部材の両端は

両側のA, B両部材によつて弾性的に拘束せられており、溶着金属は高温で変形抵抗を失つた状態にあるから、この膨脹のため閉先間隔が狭まる。(第1図b)

溶接終了後は溶着金属は収縮するので常温まで冷却した後は、C部材の自由長は最初の長さより短くなる。したがつて部材の自由収縮量は、溶接時における閉先間隔の狭まり量と溶着金属の収縮量との和になる。(第1図c)。



第1図

しかしながら実際にはC部材はその両端を拘束されているため自由な収縮がゆるされず溶接完了後には両端の拘束材によつて引張られた状態にある。

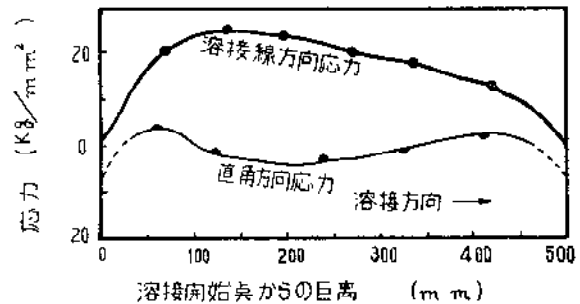
このようにしてC部材に外的ならび内的拘束による残留応力が生じ、A, B材にはそれに対応する残留応力が生ずることになる。

## 3. 残留応力の分布例

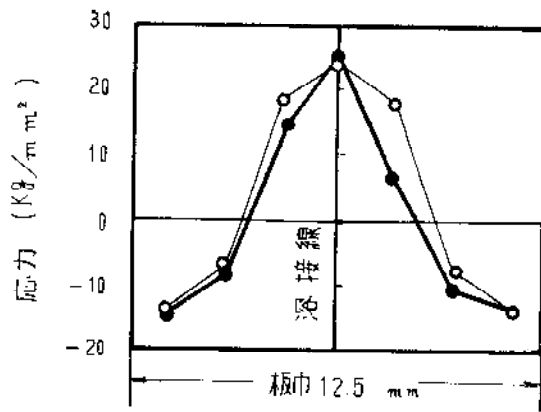
溶接接手の残留応力分布は、溶接条件・周辺の拘束条件・被溶接物の形状などによつてことなる。したがつて一概にその分布様式について断定することは出来ないが基本的な継手における分布ならびに代表的構造物における分布について述べる。

### 3.1 周辺自由な突合せ接手における残留応力分布

第2図aは長さ500mm,  $\square$  100mm, 厚6mmの2枚の軟鋼板の長辺にV型閉先をとつて突合せ溶接をした



第2図(a) 突合せ溶接継手の溶接線上の応力分布 (渡辺, 佐藤)



第2図(b) 突合せ溶接継手の溶接線方向残留応力 (Wilson & Hao)  
 註 ○印板の表面 ●印板の裏面

場合の溶接線上における残留応力の測定例である。またb図は巾 60 mm, 厚さ 19 mm の2枚の細長い軟鋼板の長辺にX開先をとって溶接した場合の溶接線に直角な断面上の応力分布である。これらよりわかるように周辺自由な溶接継手の残留応力分布は一般に次のような特性を有している。

- 1) 溶接線の中央部附近における溶接線方向の応力は溶接線に直角方向の応力に比してきわめて大きい。そしてその値は大体引張応力でその材料の降伏点近傍あるいは少々上まわる程度の大きさである。
- 2) 溶接線の両端附近では溶接線に直角方向はかなり大きな圧縮力となる。
- 3) 溶接線に直角な断面上における溶接線方向応力は、溶接線近傍では引張応力、溶接線からある程度はなれた位置では圧縮応力となる。

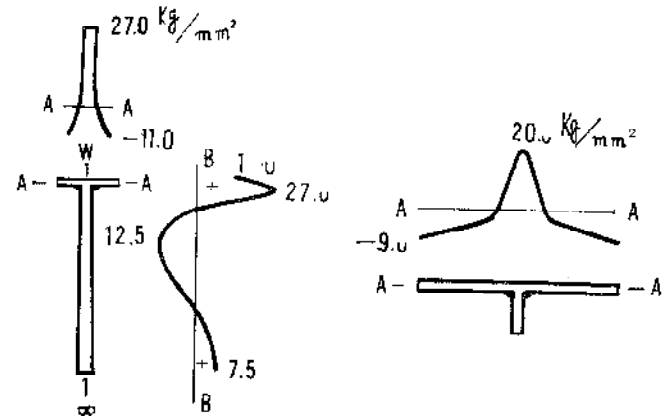
しかしこれは大体の特性であつて同じ周辺自由な突合せ継手においても溶接順序・溶接方法によつてかなりことなるものである。

### 3.2 すみ肉溶接継手における残留応力

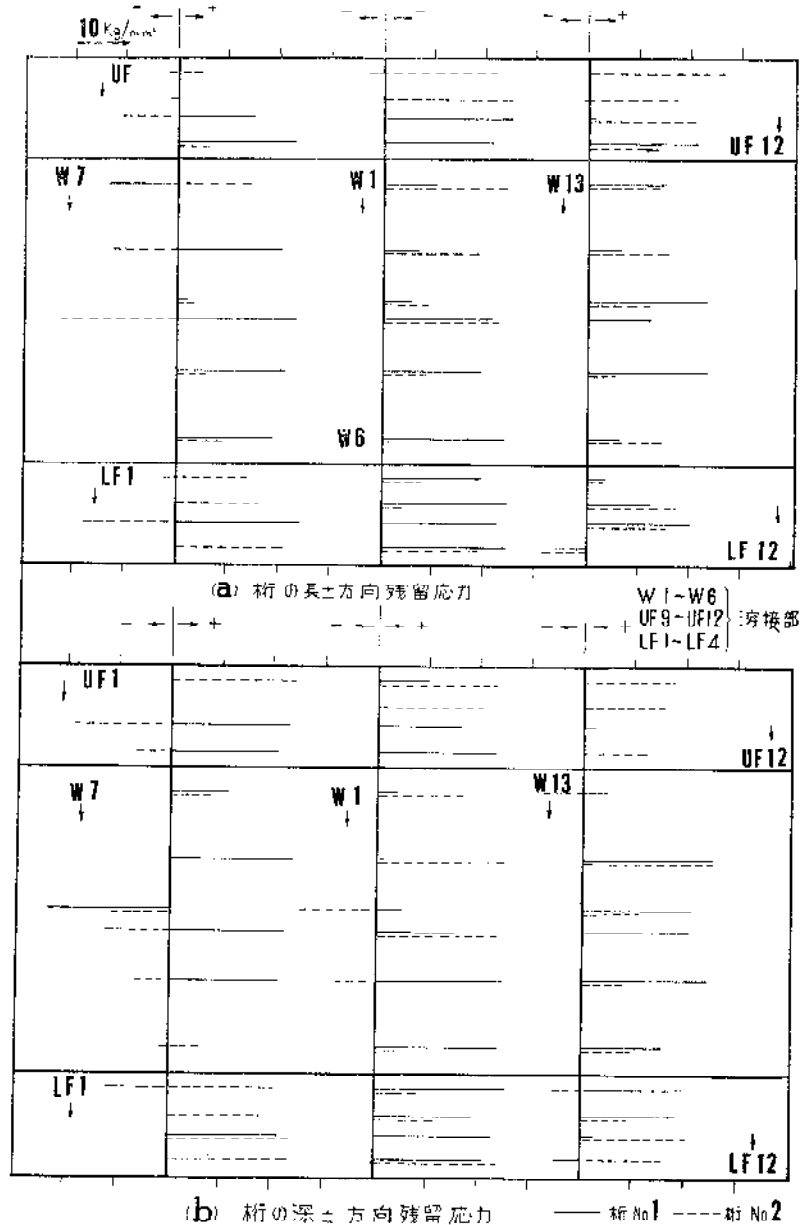
普通の基本的なT型すみ肉継手の溶接線方向の残留応力の大きさならびに分布は第3図a, bに示すようなものである。この結果からみるとフランジ巾の増大につれて残留応力の大きさは減少する傾向にあるようである。なおこの場合も溶接線に直角方向の応力は溶接線方向の応力に比べてかなり低い傾向をもっている。

### 3.3 橋梁における残留応力分布

最も簡単な構造物としてI型梁よりなる橋



第3図 T型すみ肉継手の長さ方向残留応力分布 (Bierett)  
 左 フランジ 100×15mm, ウェブ 300×10mm, 喉厚 4mm  
 右 フランジ 330×13mm, ウェブ 75×7mm, 喉厚 8mm



第4図(a) A試験片における残留応力分布 (グナート法)

梁の現場溶接継手における残留応力分布を示すと第4図 a, b のようである。これらは桁長 7800 mm, 桁深 2000 mm, フランジ巾 500 mm, フランジ厚上 25mm, 下 40 mm の同型の試験桁の中央部を第5図に示すような2つの工作方法により溶接したものである。

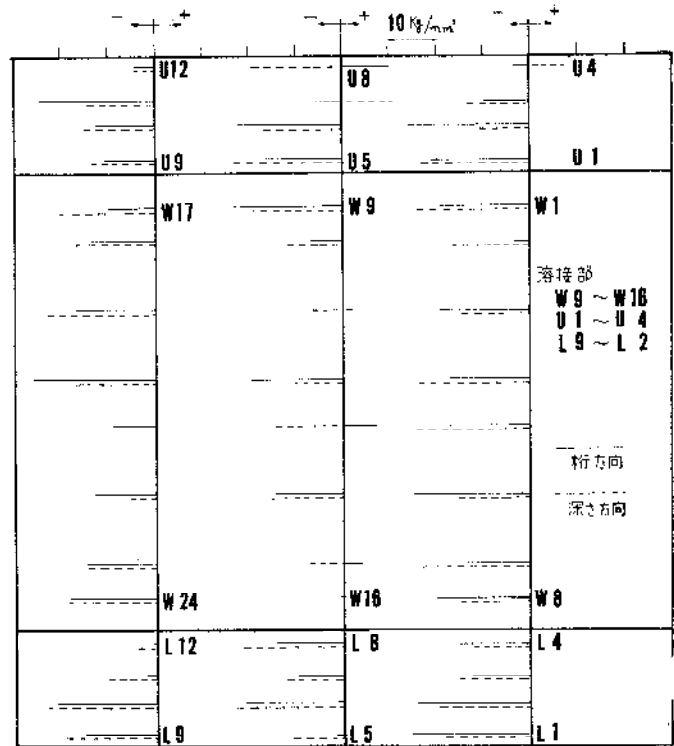
この結果をみると、A桁については溶接線方向ならびそれに直角方向の残留応力も引張応力であり、周辺自由な突合せ接手と大差ないようである。しかしB桁については溶接線上における溶接線方向の応力も圧縮となり周辺自由な場合と傾向がことなる。同様な結果は筆者の他測定によつてもみとめられている。しかもこのような結果になるものはすべて第5図bのような工作順序によつており、したがつて工作順序の影響と考えられる。

### 3.4 船舶における残留応力

船体建造中の地上ブロックにおける溶接については種々発表せられ、周辺自由な接手と大差のないことが知られている。

したがつてここでは Master Butt 接手のように拘束がきわめて大きく、残留応力もきわめて苛酷であると考えられているものについて述べる。

第6図に主要寸法を示すような2隻の船舶において、船体引延しあるいは船台期間短縮のため船体の  $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$



第4図(b) B桁における残留応力分布(グナート法)

に近い大ブロックを第6図に示すような要領により突合せ溶接を行っている。

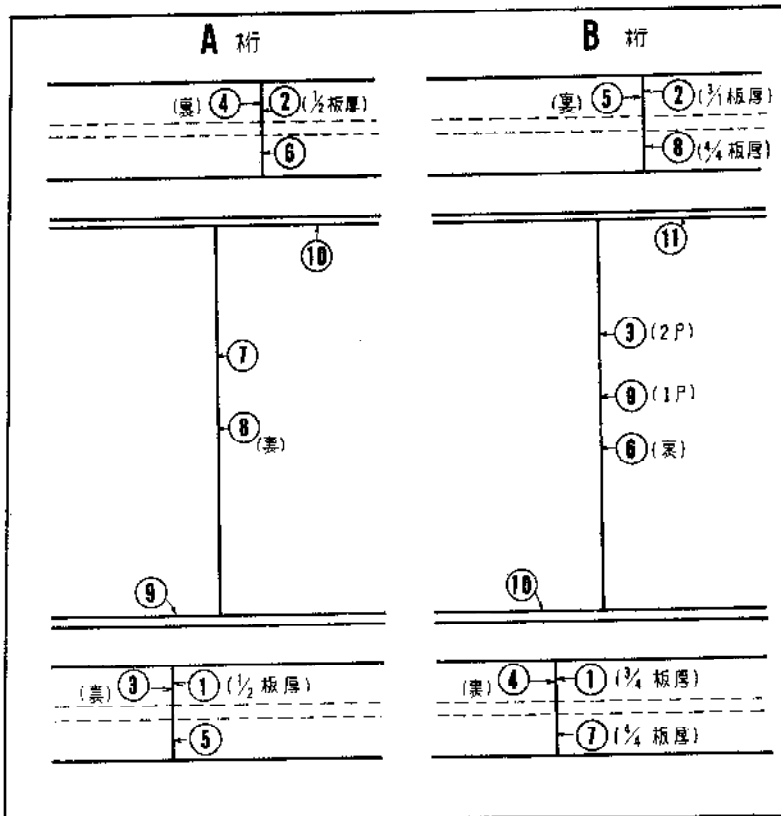
この接手線上について残留応力をグフート法により測定した結果が第7図 a, b である。ここに船体横方向応力とは溶接線方向応力のことである。この結果からみるといずれの方向の応力もごく特殊な点を除いて 20~35 kg/mm<sup>2</sup> 程度で使用材の降伏点近い値で周辺自由なものとは値の上では大差がない。この事はこのような大ブロックの突合せ接手においても拘束の度合は余り大したものではなく、むしろ船口端のような不連続部あるいは切欠部などの方が値としては大きいようである。

## 4. 残留応力の影響

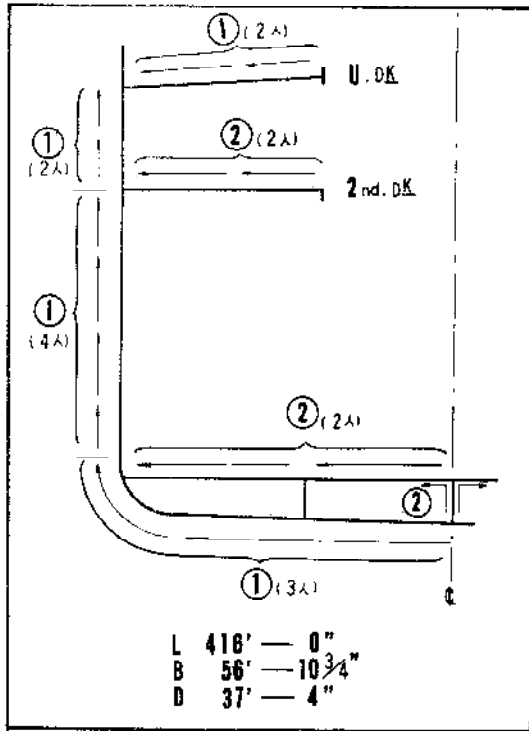
前述したように溶接接手に残留する応力は材料の降伏点あるいはそれを上回るような値を示す。よつてこのような残留応力が構造物の使用状態にどのような影響を与えるかについて基本的なものの概略を述べる。

### 4.1 静的強度におよぼす影響

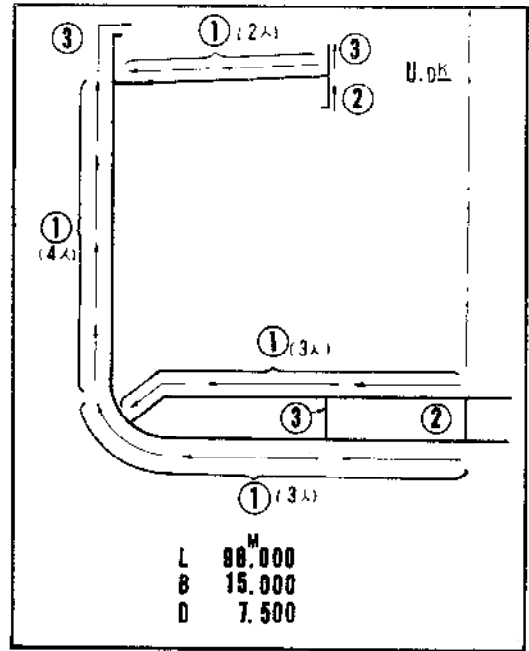
構造物を構成する材料が十分な延性を示す限り、残留応力は構造物の降伏あるいは破壊にほとんど影響しないと考えて



第5図 測定試験桁の溶接順序



第6図(a) A船の溶接順序(両舷対称)



第6図(b) B船の溶接順序(両舷対称)

良い。

溶接残留応力を有する材料に静的荷重が作用する場合を考えると、まず残留応力の存在する部分は比較的低い荷重で降伏する。しかしながら材料は本来自己救済能ともいべき性質を有しているため、その以後の荷重はまだ降伏していない部分が受けもち、残留応力の存在していた部分はただ伸びるだけである。そして材料の全断面が降伏してから再び応力を受けもつようになるためである。

4.2 脆性破壊との関係

軟鋼のような延性材料と考えられている材料でも、あ

る条件のもとでは伸びのきわめて少しいわゆる脆性破壊をする場合のあることは衆知の事実である。

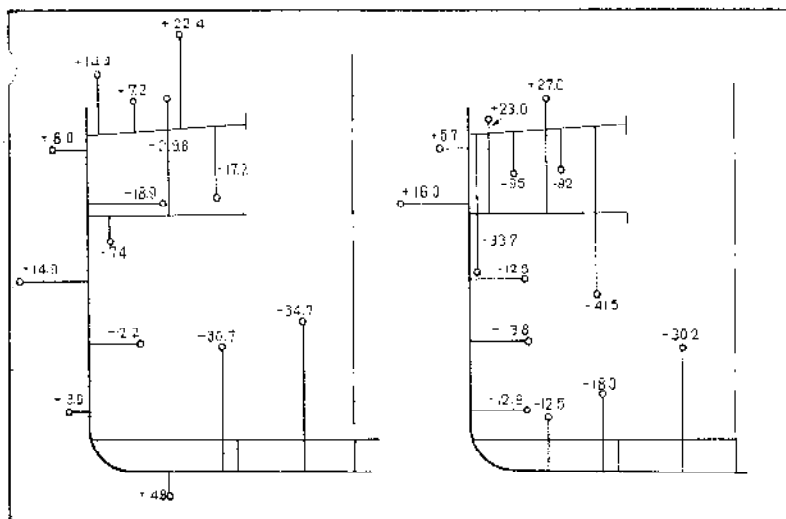
残留応力との関係についても現在まで多くの研究がなされまた現在においても鋭意研究されているが、残留応力の存在する場所に鋭い切欠があり、多軸性の応力が作用する場合には重大な影響を与えることが知られている。

したがって溶接構造物を設計施工する場合には、設計上の不連続、あるいは工作上的欠陥などに出来るだけ避け、またこのような多軸性応力の発生する位置には高い残留応力を残さよう特別の留意が必要である。

4.3 疲労強度におよぼす影響

残留応力が疲労に対してどのような影響を与えるかについては明確な断定が下されないのが現状である。その理由としては溶接接手の疲労強度は、接手部の材質の変化、形状変化、微小亀裂その他の欠陥などの存在によつて敏感な影響をうけるため、残留応力のみを取出して扱う事が困難なためである。したがって応力除去焼鈍をした試験片に対する多くの結果をみても相反した結果が多く存在している現状である。

さらに繰返し応力を受けることによつて残留応力は低下するから疲労には大して影響がないとの考え方もあるが、これは単純な小型試験片による結果であるため、直ちに複雑な構造物についてこのように結論することは早計である。



a) 船体横方向応力      b) 船体縦方向応力  
第7図(a) A船 Master Butt 部の残留応力分布

4.4 振動特性におよぼす影響

軸方向に引張応力が作用していると固有振動数は高くなり、反対に圧縮応力があると低下する、したがって残留応力が存在すると固有振動数は変化するものと考えられる。しかしながら溶接残留応力はその特性上、引張の部分と圧縮の部分とが系全体として釣り合っているため、特に構造物の固有振動数に変化を与えるとは考えにくいものである。

4.5 応力腐食におよぼす影響

応力の存在する状態では材料の腐食抵抗は変化する。特に一様な応力分布ではなく溶接残留応力のように局部的に高い応力が集中している場合特に重要である。

その影響度は使用材料・使用雰囲気（腐食液）などによつて異なるが、不銹鋼の場合は特に重要であり現在多くの研究がすすめられている。

5. 溶接残留応力に対する考え方

前述したように構造物の溶接部に残留する残留応力は材料の降伏点近い値である。したがって従来から残留応力の影響を論ずるときはその無影響のみを重大視して、溶接残留応力は危険なものであるとの立場に立つ事が多かった。

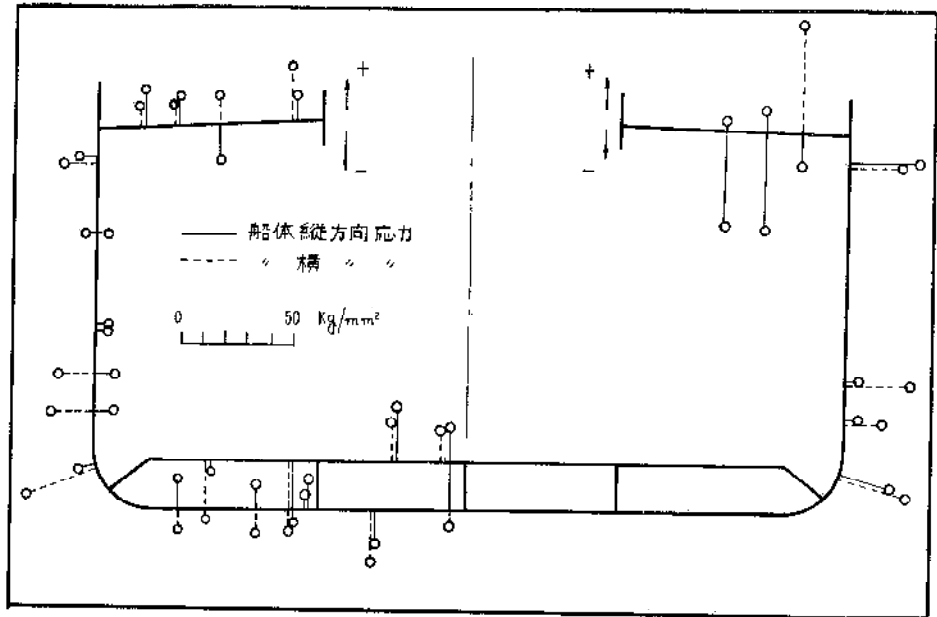
しかし残留応力の分布の項でも述べたように、構造物における溶接残留応力はその工作法の選定によつて変化する事が可能な点に留意して、むしろ進んで溶接残留応力を利用する設計法あるいは工作法のあることを明白にしたい。

5.1 坐屈強度と溶接残留応力

坐屈現象は圧縮力の作用によつて生ずるものであるからこのような場合、溶接部における引張残留応力が存在すればどのようなようになるかは興味ある一問題である。

筆者はこれに関して4辺弾性支持矩形板の中央部荷重方向に引張残留応力および圧縮残留応力の存在する場合の坐屈限界値について理論的に研究をしさらに実験的にも研究した。その結果坐屈限界値として次式が得られた(第8図参照)。

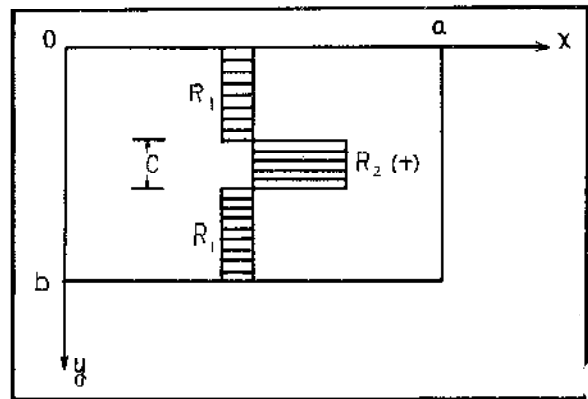
$$P_{cr} = \frac{\pi^2 a^2 D}{m^2} \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2 + R_2 \cdot \frac{\sin \frac{\pi c}{b}}{\pi (b-c)} \quad \text{B)}$$



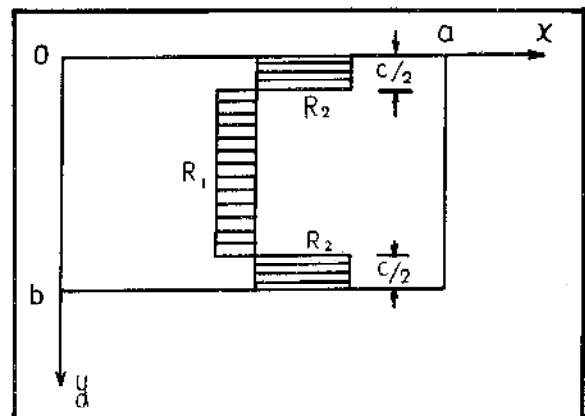
第7図(b) B船 Master Butt 部の残留応力分布

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 a^2 D}{m^2} \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) + R_2 \frac{\sin \frac{\pi c}{b}}{\pi (b-c)} \quad \text{C)}$$

この中式 B) は第8図 a) の場合であり、式 c) は第8図 b) の場合である。これら2式の右辺第1項は残留応力の存在しない4辺弾性支持矩形板の値を与えるものである。



第8図(a)

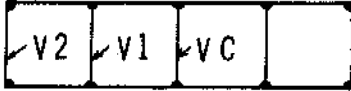
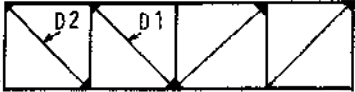

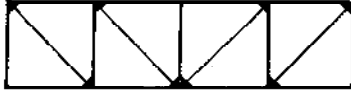


第8図(b)

第1表 坐屈試験結果

試験片寸法		試験番号	坐屈限界荷重			実験値と計算値の比		
a mm b	h mm		実験値 Pcr. ex	A式による計算値 Pcr. M	B, C式による計算値 Pcr. RS	Pcr. ex Pcr. M	Pcr. ex Pcr. RS	
149.8 150.0	1.59	15M	11	2050	2034	.....	101.0	.....
			12	2000	2034	.....	98.5	.....
150.15 149.8	1.61	15M	21	2100	2106	.....	100.0	.....
			22	2050	2106	.....	97.5	.....
149.8 150.0	1.59	15T	11	2100	2034	2195		95.5
			12	2300	2034	2195		104.5
			13	2200	2034	2276		100.0
150.0 149.55	1.61	15T	21	2300	2114	2276		101.0
			22	2200	2114	2276		97.0
149.7 150.0	1.56	15C	11	1800	1920	1768		101.8
			12	1750	1920	1768		99.0
150.1 149.85	1.59		21	1850	2031	1870		98.8
			22	1900	2031	1870		101.8
124.55 149.8	1.61	12M	11	2050	2181	.....	94.0	.....
			12	2150	2181	.....	98.5	.....
125.30 149.9	1.59	12M	21	2100	2101	.....	100.0	.....
			22	2150	2101	.....	102.3	.....
125.4 149.86	1.61	12T	11	2250	2178	2340		96.3
			12	2500	2178	2340		106.3
			13	2350	2178	2340		100.3
125.4 149.9	1.61	12T	21	2350	2178	2340		100.3
			22	2350	2178	2340		100.3
124.65 149.0	1.59	12C	11	1900	2111	1950		97.5
			12	2000	2111	1950		102.5
124.50 149.75	1.60		21	1900	2144	1950		96.0
			22	1950	2144	1950		98.5
100.25 150.50	1.61	10M	11	2380	2466	.....	96.5	.....
			12	2400	2466	.....	97.5	.....
100.15 150.0	1.61	10M	21	2450	2470	.....	99.3	.....
			22	2450	2470	.....	99.3	.....
99.85 149.80	1.57	10T	11	2400	2299	2457		97.6
			12	2500	2299	2457		101.7
100.00 150.50	1.61		21	2600	2470	2633		99.0
			22	2550	2470	2633		97.0
100.00 150.00	1.61	10C	11	2250	2475	2313		97.5
			12	2350	2475	2313		101.5
100.00 149.9	1.62		21	2300	2519	2356		97.8
			22	2400	2519	2356		101.8

第2表 試験体ならびに使用材一覧

試験台番号	節点分類	工 作 順 序	試 験 種 別
No. 111	完全鉸節点		予備実験
112			曲げ
113			残留応力測定
121	不完全鉸節点		予備実験
122			曲げ
123			残留応力測定
212	完全鉸節点		曲げ
213			残留応力測定
222	不完全鉸節点		曲げ
223			残留応力測定

使 用 材 料			使 用 位 置		降 伏 点	引 張 強 さ
名 称	外 径	肉 厚	試験体型式	部 材 名	kg/mm <sup>2</sup>	kg/mm <sup>2</sup>
STK 41	27.2 mm	2.3 mm	No. 100 型 200 型	斜 部 材	27.8	43.0
STK 41	48.6	2.8	100 型	水 平 部 材 垂 直 部 材	20.2	42.3
STK 41	48.6	3.2	200 型	同 上	20.4	42.0

第3表 トラス試験体の各部材応力

		$\frac{Pr}{2}$ 時における各部材に働く応力			Pr 時における各部材に働く応力			残留応力 kg/mm <sup>2</sup>
		実験値 kg/mm <sup>2</sup>	計算値 kg/mm <sup>2</sup>	実験値 計算値	実験値 kg/mm <sup>2</sup>	計算値 kg/mm <sup>2</sup>	実験値 計算値	
No. 112	VC	10.0	11.2	89.5	21.9	22.4	93.3	3.8
	V1	6.4	5.6	114.0	11.3	11.2	101.0	15.8
	V2	5.4	5.6	96.5	8.8	11.2	98.6	14.8
	D1	18.8	17.8	105.5	31.4	35.6	88.3	11.8
	D2	20.8	17.8	116.8	33.0	35.6	92.7	14.8
No. 122	VC	10.5	10.4	101.0	23.6	20.8	113.0	2.8
	V1	6.6	5.2	127.0	15.0	10.4	144.0	13.8
	V2	5.6	5.2	108.0	10.8	10.4	104.0	13.8
	D1	19.2	16.6	107.5	35.0	33.2	105.5	15.8
	D2	22.0	16.6	132.5	39.4	33.2	118.5	16.2
No. 212	VC	10.4	10.3	101.0	20.6	20.6	100.0	7.8
	V1	5.7	5.2	109.0	10.3	10.3	100.0	13.6
	V2	5.0	5.2	96.3	10.0	10.3	97.0	14.0
	D1	12.4	18.5	67.0	25.0	37.0	67.7	4.6
	D2	14.8	18.5	80.0	29.2	37.0	78.8	4.0
No. 222	VC	10.0	10.1	98.3	20.4	20.2	101.0	9.8
	V1	5.5	5.1	108.0	10.6	10.1	105.0	15.0
	V2	4.0	5.1	79.3	8.0	10.1	80.8	15.6
	D1	12.4	18.2	68.3	25.2	36.4	69.5	4.0
	D2	14.6	18.2	80.3	29.2	36.4	80.3	4.0

(48頁より続く)

る。なお第1表は実験結果の1例である。

したがってこれらの結果よりわかるように作用する外力の種類によつて、危険視されている引張残留応力もかえつて有効に利用しうる場合のある事が明白となつた。

## 5.2 トラス構造物と残留応力

複雑な構造物においても工作順序によつて残留応力分布を変化しうる事は明らかになつている。したがつてここでは系全体に均一に作用しているような残留応力の利用について述べる。

溶接トラスを建造する場合、一般には工作上出来るだけ簡単に進められるような部材から取付ける事が多い。したがつて場合によつては引張部材を最後にはめ込め溶接するため大きな引張残留応力が存在している場合がある。

よつて筆者は第2表に示すように平行弦トラスを、工作上的便宜性より引張部材を最後にする工作法(No. 100代)および工作上的便宜性を犠牲にした圧縮材により大なる引張残留応力を残す工作法(No. 200代)の2つによつて製作し、それぞれの荷重下の挙動を調べた。その結果の一例を第3表に示す。

その結果このような単純な外力の作用する構造物では残留応力と外力が疊重するため筆者の試みは成功したものとみることが出来る。すなわち、引張部材→圧縮部材の順序で溶接したものでは、圧縮部材→引張部材の順で溶接したものより、引張部材における引張残留応力が低くまた圧縮部材においては引張残留応力が高い、その結果荷重下においても前者は理論値にひとしいかあるいは理論値の80%程度の応力しか生じていない。

## 6. むすび

以上溶接工作法を採用する限り不可避な溶接残留応力の概要について述べて来た。

ここで特に筆者の強調したいのは残留応力は工作法の選定によつてある程度任意にかえる事が出来るものである。したがつて残留応力を徒らに危険視しておそれるのみでは問題の解決はえられないものであつて、むしろその構造物の使用状態、あるいは構造部材の受持つ力の種類を充分考慮吟味して、外力と逆方向の残留応力が残るような設計法・工作順序を指定して残留応力を利用するような方向に進むべきであるという事である。