

裏波溶接部の疲れ強さ

Fatigue Strength of "Uranami" Butt Welds

西岡章夫* 大内田久**
Akio Nishioka Hisashi Ouchida

内 容 梗 概

溶接構造物においては裏溶接の不可能な継手部分があり、片側からの溶接では初層部に溶接欠陥が生じやすく強度低下の因となることが多い。最近開発された深溶け込み棒により表側からの溶接で裏側にも良好な溶接ビードを作りうるいわゆる裏波溶接法を用いた場合の疲れ強さを求めた。試験結果は引張応力を受ける突合せ継手、曲げ応力を受けるTおよび管継手のいずれの場合においても、従来の裏当溶接、初層ヘリアーク溶接と比べて強度的に遜色ないといえるようであるが、T継手においては初層溶け出し部の形状により大きなばらつきを生じたことなどから施工法の検討が肝要であろう。

1. 緒 言

突合せ溶接の疲れ強さについては従来多くの実験がなされており、Newman, Gurney 両氏⁽¹⁾や Becker, Rieger 両氏⁽²⁾の溶接部の表面形状に関するもの、多田氏⁽³⁾らのビード趾端のアンダーカットの影響を調べたものなどからわかるように、溶接部の表面状態が著しく疲れ強さに影響するようである。

裏溶接のできない突合せ溶接部においては、初層部にスラグ巻き込みや溶け込み不良などの溶接欠陥を生ずることがあるため、裏当溶接や初層をガスまたはヘリアーク溶接する方法がとられている。しかし施工法や経済性の点で問題が残されているので、最近市販された深溶け込み棒により表側からの溶接により裏側にも良好なビードを形成する裏波溶接法の実用化を図るために従来の溶接法との比較を行なったものである。

継手種類は、直応力を受けるものとして突合せ継手、曲げ応力を受けるものとしてT継手、管継手の3種とした。試験片は日立製作所の各工場で分担作製したものをを用いたので、施工場所により溶接条件が異なりそれが疲れ強さに影響することが考えられたため、T継手と管継手は各2組ずつ試験した。実験データにばらつきを生じたものもみられたが各溶接法による継手の疲れ強さをほぼ明らかにすることができた。

2. 供試材料および試験方法

2.1 母 材

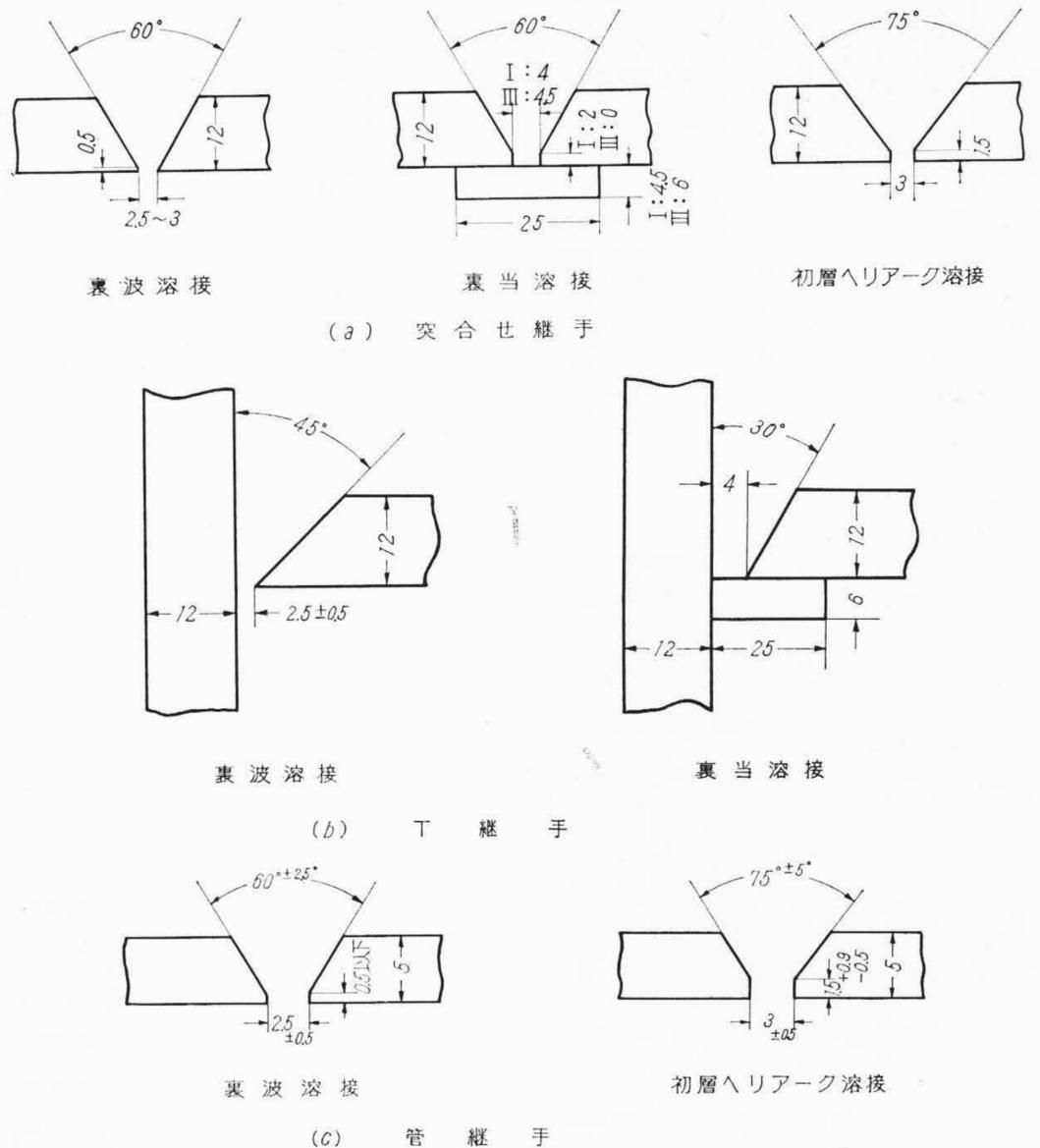
供試母材としてはSM 41 A の12 mm 鋼板ならびに直径 50, 60 mm, 肉厚 5.5 mm の STP 鋼管を用いた。その化学成分と機械的性質はそれぞれ第1表に示すとおりである。突合せ継手の裏波、初層ヘリアーク溶接を除き、母材と溶接条件の異なったおの2組ずつの試験片を作りデータのばらつきをも検討することにした。

2.2 開先形状と溶接条件

各継手形式の開先形状を第1図に、溶接条件を第2表に示す。T継手、管継手では各溶接法で開先形状を統一したが、溶接条件は各施工場所で採用している方法を用いたためいくぶん異なっている。裏波溶接棒としては二重被覆のLB-55 R, 一重被覆のLB-55 U, RP-1の3種を使用した。

* 日立製作所日立研究所

** 日立製作所日立研究所 工博



第1図 各種開先の形状および寸法

突合せ、T継手の溶接試験片には、次に述べる疲れ試験片が4~6個採れる大きさのものを作製したが、その場合溶接棒の継ぎ目が疲れ試験片に含まれないように行なった。また溶接後の焼なまし、ひずみとりなどは行なわず溶接のまま試験した。

2.3 疲れ試験片および試験方法

(a) 突合せ継手試験片

試験片形状は第2図(a)に示す JIS 2号疲れ試験片である。表面仕上げを行なわないので、ビード余盛りの大小その他表面形状に差異を生じたものがあるが、同一系列のものではそろえるようにした。

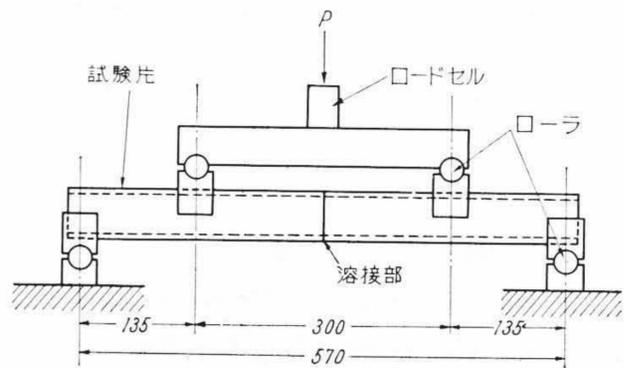
疲れ試験はストレインゲージを試験片にはり、曲げ応力のかからないように試験片を取り付け、下限応力 2 kg/mm² の片振り引張りとした。疲れ強さは以下に述べるT継手、管継手においても

第 1 表 供 試 材 の 諸 性 質

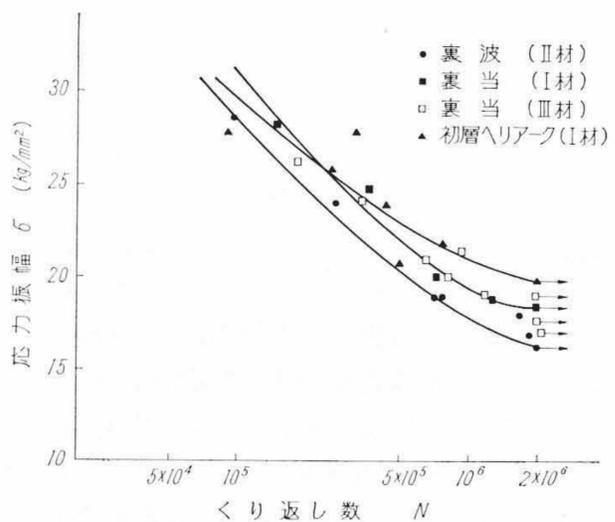
試料 No.	継手形式	裏波	裏当	初層ヘリアーク	化 学 成 分 (%)						機 械 的 性 質 (kg/mm ² ,%)			
					C	Si	Mn	P	S	Cu	σ_B	σ_s	ϵ	φ
I	突合せ		○	○	0.17	0.07	0.58	0.016	0.018	—	43.0	28.5	29.8	48.9
II	突合せ	○			0.18	0.01	0.54	0.057	0.025	—	42.6	25.3	28.6	56.2
III	突合せ		○		0.17	0.11	0.59	0.024	0.019	—	43.5	27.2	31.5	59.6
IV	T	○			0.20	0.09	0.58	0.015	0.016	—	43.8	27.1	27.8	—
V	T	○			0.19	0.03	0.62	0.016	0.006	—	43.5	27.0	29.2	48.5
VI	T		○		0.22	0.01	0.38	0.018	0.014	—	43.4	26.6	29.2	48.3
VII	T		○		0.18	0.05	0.41	0.012	0.014	—	42.7	26.2	28.5	50.1
VIII	管	○		○	0.11	0.03	0.47	0.016	0.011	0.08	36.2	23.0	44.5	—
IX	管	○		○	0.16	0.31	0.56	0.012	0.024	0.07	46.3	31.2	37.5	—

第 2 表 試験片の溶接条件

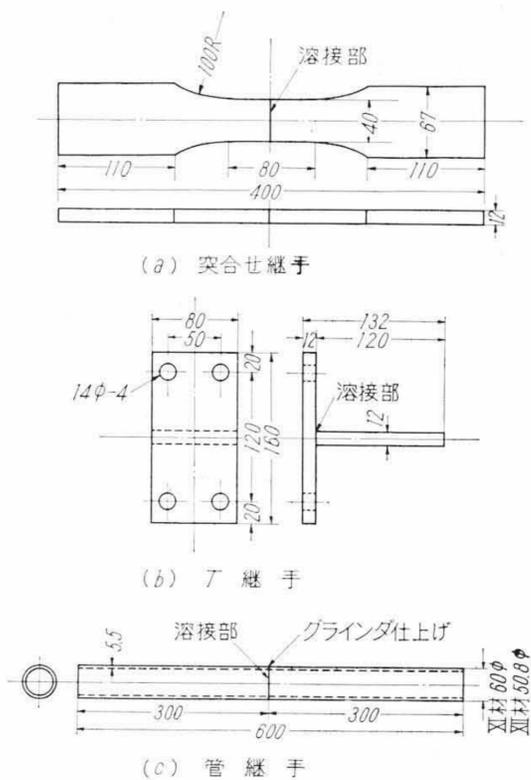
継手形式	溶接法	試料	溶接棒	溶接電流 (A)	層数
突合せ	裏波	II	初層 LB-55R (3.2φ) LB-26 (4,5φ)	80~90 160~230	5
	裏当	I	LB-26 (4,5φ)	160~210	8
	裏当	III	終層 LB-26 (4,5φ) TB-24 (5φ)	170~240	5
	初層ヘリアーク	I	初層 Oxweld # 65 B-17 (4,5φ)	95 160~210	8
T	裏波	IV	初層 RP-1 (4φ) FX-1 (4,5φ)	130 180~230	4
	裏波	V	初層 LB-55R (3.2φ) LB-26 (3.2,4φ)	100 90~190	7
	裏当	VI, VII	B-17 (4φ)	170~210	6
管	裏波	VIII	LB-55R (2.6φ) LB-26 (3φ)	70 100	2
	裏波	IX	LB-55U (2.6φ) LB-26 (2.3φ)	60 80	2
	初層ヘリアーク	VIII	DM-2 (2φ) LB-26 (3φ)	130 100	3
	初層ヘリアーク	IX	Oxweld # 65 LB-26 (2.6φ)	80~90 80	2



第 3 図 管継手の負荷方法



第 4 図 突合せ継手の S-N 曲線



第 2 図 各種試験片の形状および寸法

同様で、くり返し数 2×10^6 回における上限と下限の応力差にて示した。なお試験はローゼンハウゼン万能疲れ試験機 (UHS 100, 容量 100/60 t) を使用し 600 c. p. m にて行なった。

(b) T 継手試験片

第 2 図 (b) に試験片の形状を示す。フランジとウェブとが 90 度になるように指定したが、溶接前の逆ひずみと溶接後の熱変形の関係で完全な T 形になっていないものもあった。その他裏当溶接における裏当金の付き方や裏波溶接における初層溶け出し部の形状など施工法により形状を異にするところが多く、これらが疲れ強さに大きく影響したが詳しくは後述する。

疲れ試験はフランジ側を固定しウェブに負荷したが、初層側が

引張りになるような片張り曲げとし下限応力は $2 \sim 4 \text{ kg/mm}^2$ で行なった。試験にはアムスラ型パルセータにより駆動する 20 t の動的オイルジャッキを用いたが、あらかじめ荷重と試験片のウェブ中間にはったストレインゲージの読みとの関係を求めておき、動的に検出して所定の荷重を加えた。この場合応力はウェブ根元の板厚当りの曲げ公称応力にて表わすことにした。

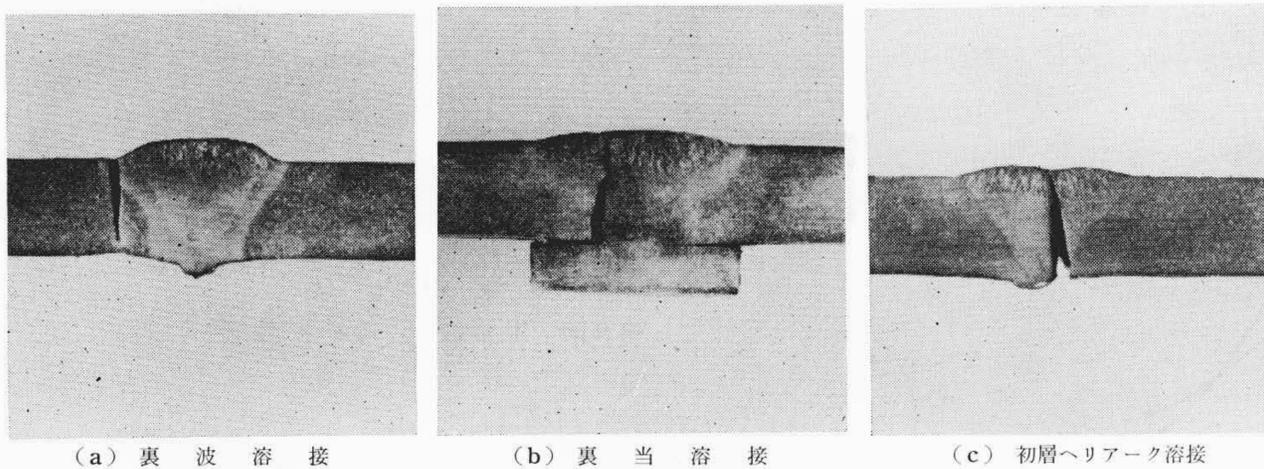
(c) 管 継 手

管外径が 50, 60 mm の 2 種類につき試験したが、両者とも全長 600 mm の中央で突合せ溶接してある。形状、寸法は第 2 図 (c) のようであり、この場合には管の外表面のビード余盛りはグラインダ仕上げとした。

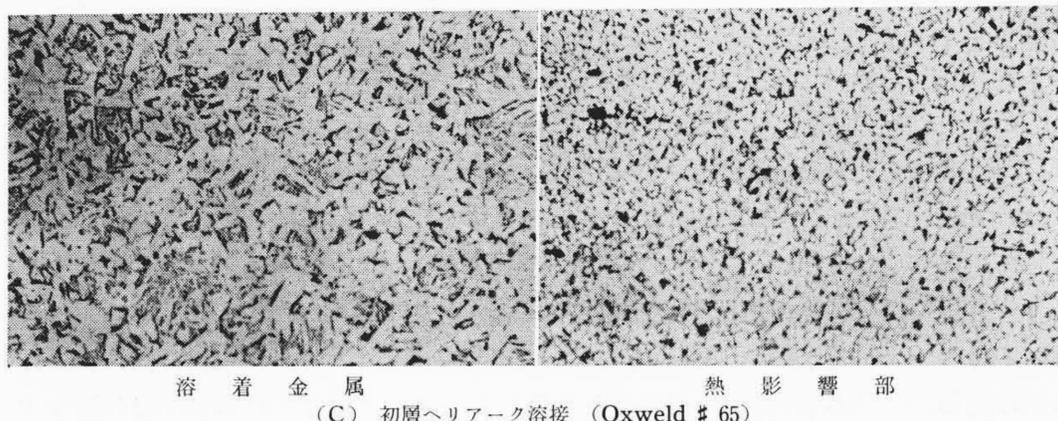
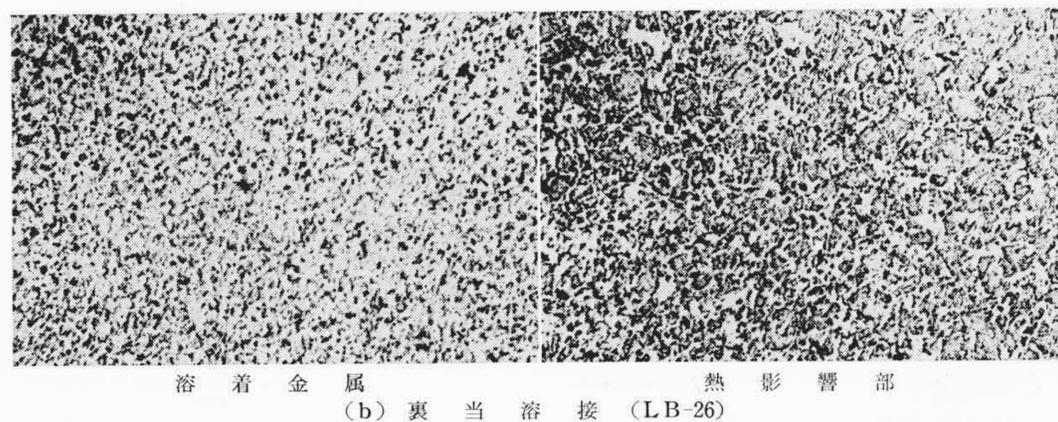
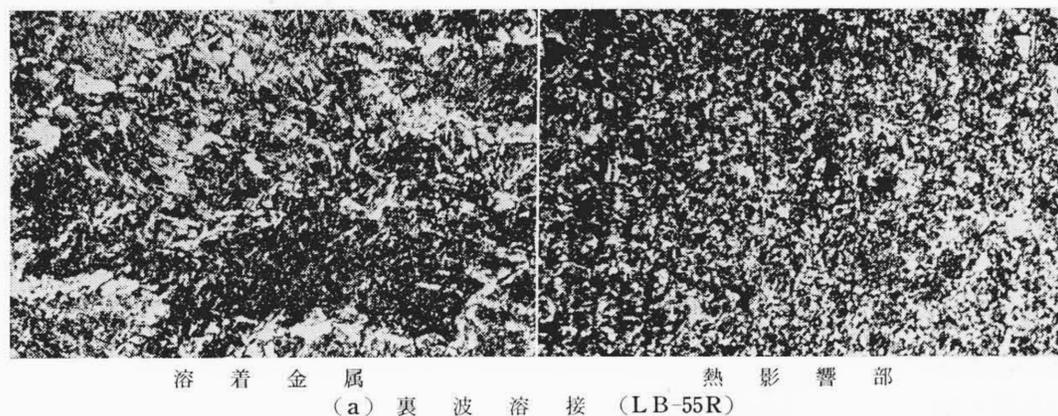
試験方法は第 3 図に示すとおりで、管のたわみによる支点間および荷重点間の間隔の変化を各点のローラにて受け持たせ、管には軸力のかからないようにし、均一曲げモーメント間に溶接部をもってきた。応力はグラインダ仕上げしたビード上にはり付けたストレインゲージの測定値より求めたが、後述するように疲れき裂がすべて管の内面から発生したため、疲れ強さとしても管内面の応力の値に換算して示すことにした。下限応力は 2 kg/mm^2 の片張り曲げで前述の動的オイルジャッキによりくり返し速度 600 c. p. m にて負荷した。

第3表 各種試験片の疲労試験結果

継手形式	溶接法	試料	上限応力 (kg/mm ²)	下限応力 (kg/mm ²)	応力振幅 (kg/mm ²)	平均値 (kg/mm ²)	裏波溶接に対する 強度率(%)	主なき裂発生箇所
突合せ	裏波	II	18.4	2.0	16.4	16.4	100	余盛り, 溶出し趾端部
	裏当	I	20.4	2.0	18.4	18.4	112	スリット部, 余盛り趾端部
		III	20.4	2.0	18.4			
	初層ヘリアーク	I	22.0	2.0	20.0	20.0	122	溶出し趾端部
T	裏波	IV	24.8	2.0	22.8	25.7	100	溶出しウェブ側趾端部
		V	32.6	4.0	28.6			
	裏当	VI	24.8	4.3	19.9	23.8	93	ウェブ側スリット先端 フランジ側スリット先端
		VII	29.8	2.0	27.8			
管	裏波	VIII	27.6	2.0	20.9	20.1	100	溶出し趾端部
		IX	26.0	2.0	19.3			
	初層ヘリアーク	VIII	26.0	2.0	19.6	18.7	93	溶出し趾端部
		IX	24.0	2.0	17.8			



第5図 突合せ継手の疲れ破壊状況



第6図 各溶接法の顕微鏡組織 (×100)

3. 実験結果ならびに考察

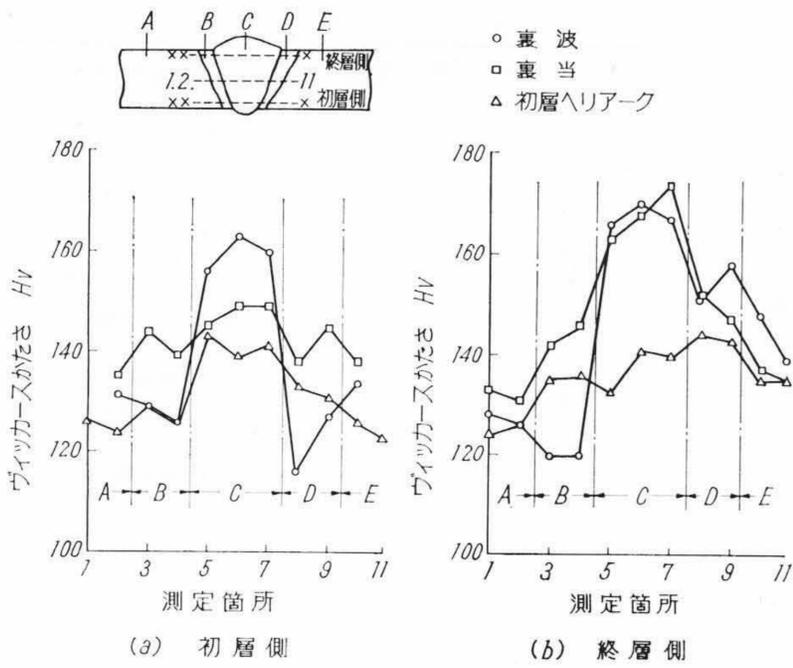
3.1 突合せ継手

疲れ試験により得られた S-N 曲線を第4図に、全試験結果をまとめたものを第3表に示す。裏波溶接の疲れ強さが16.4 kg/mm²に対し、裏当溶接では I, III材とも18.2kg/mm²で約12%強くなり、初層ヘリアーク溶接でも20.0 kg/mm²と約22%強度が増している。これは第5図の疲れ破壊状況および第3表のき裂発生

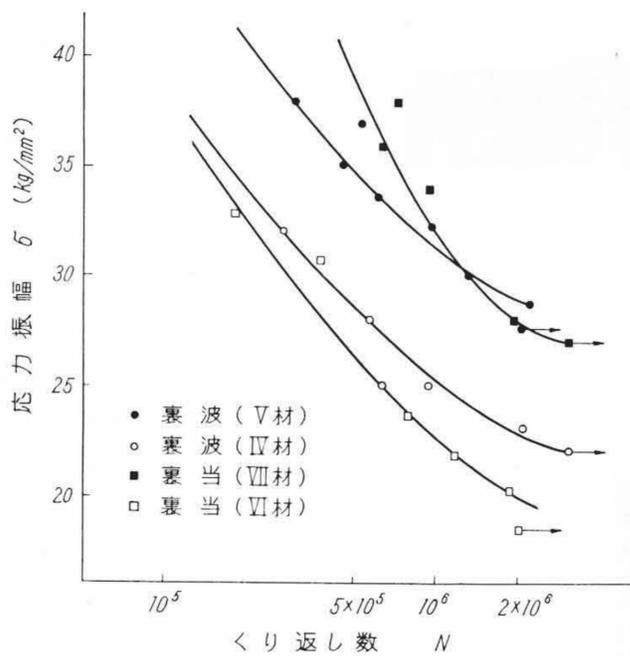
箇所からわかるように、ビード余盛りと初層溶け出し部の形状によるものと考えられる。すなわち裏波溶接の余盛りが大きく、この部の応力集中が増したため、この余盛り部が過半数の試験片のき裂発生点となっているのに対し、裏当溶接では裏当板とのスリット先端や、なめらかな余盛り趾端からき裂が発生しており、また初層ヘリアーク溶接でも裏波溶接の初層溶け出し部よりもなめらかな箇所からき裂が生じ、かつ破断面の断面積が大きいことなどの影響と考えられる。また第6図の顕微鏡組織および第7図のかたさ分布をみると、初層ヘリアーク溶接に比し裏波、裏当溶接では組織が微細化し硬化しており、とくに裏波溶接は急冷されるため樹状組織を呈し、初層部のかたさが急激に増している。終層側では裏波、裏当溶接とも同一であるためかたさ分布も大差なくなっている。このような組織的な切欠効果も上述の各溶接法の強度差に影響したと思われるが、形状の影響の方が大きいと考えられるので、溶け出し部や余盛り部がなめらかなようになるよう施工すれば裏波溶接も十分な強度が得られるであろう。

3.2 T 継手

片振り曲げ試験により得られた S-N 曲線を第8図に示す。裏波溶接の疲れ強さはV材が28.6 kg/mm²に対し、IV材では22.8 kg/mm²でありばらつきが大きく、裏当溶接をみても同様に大きな強度差を生じている。T継手の疲れ試験は初層側が引張りになるような片振り曲げとしたため、初層側の表面形状によりばらつきを生じたものと考えられる。すなわち第9図のマクロ組織にみられる試験片端面形状からわかるように、強度の低い裏波溶接のVI材は初層溶け出し量が多くなりウェブ側趾端部にアンダーカットがあること、



第7図 突合せ継手のかたさ分布

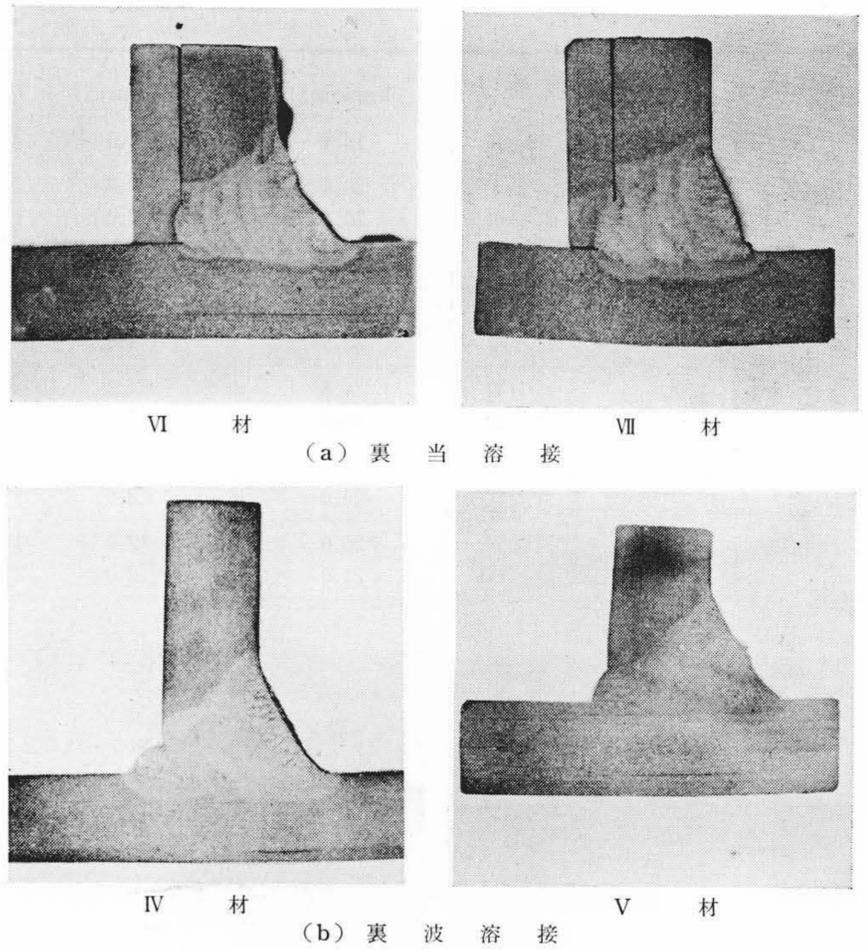


第8図 T継手のS-N曲線

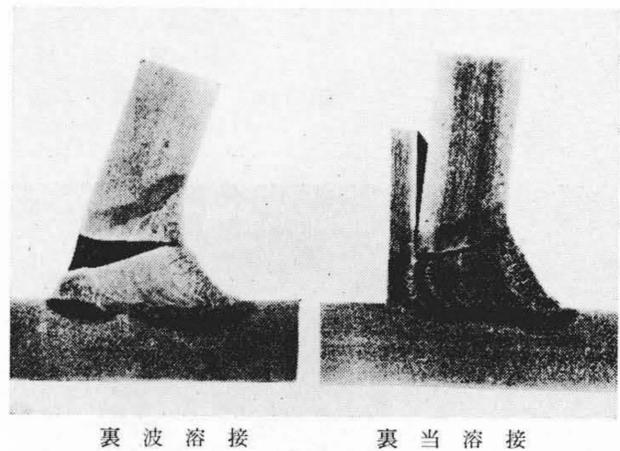
また裏当溶接ではVII材の裏当板が密着していないため疲れき裂の発生したウェブ側およびフランジ側のスリット先端の応力集中が大きくなったこと、スミ肉量がVI材よりも少ないためフランジ板厚の根元の公称応力にて表わした応力はスミ肉量が多い場合よりも低くなったことなどがあげられる。このように裏波溶接、裏当溶接ともにばらつきは大きくなっているが、両者の大まかな強度比較としてそれぞれの算術平均値をとると、裏波溶接が25.7 kg/mm²に対し裏当溶接では23.8 kg/mm²となり裏波溶接の方がやや疲れ強さが高いようである。参考までに疲れ破壊の一例を第10図に示す。ここでS-N曲線を見るとこう配が急になっているが、応力段階の高いところではき裂発生部の応力の集中する部分が局部的に降伏するため、応力集中の緩和、加工硬化あるいは残留応力が軽減されることなどの影響により寿命が延びたことによるものと考えられる。

3.3 管 継 手

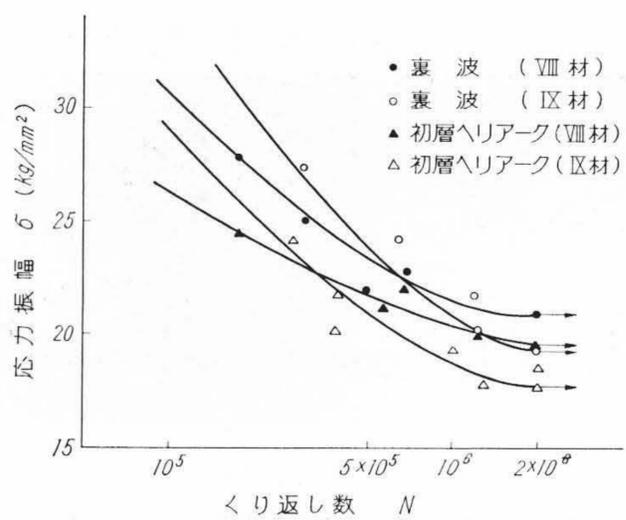
第11図に片振り均一曲げ試験により得られたS-N曲線を示す。疲れ強さは裏波溶接のVIII材が20.9 kg/mm²、IX材が19.6 kg/mm²となり、初層ヘリアーク溶接ではVIII材が19.3 kg/mm²、IX材が17.8 kg/mm²である。第1表の引張り強さではIX材の方が10 kg/mm²程度高いにもかかわらず疲れ強さでは逆にVIII材の方が強くなっているのは、溶接による強度低下の割合が違っているためであろう。管継手では表面のビード余盛りをグラインダ研削したので、第12図の疲れ破面写真からわかるように全試験片ともき裂は内側の溶け出し部趾端より発生した。したがって、管内面に溶け出した溶着金属の



第9図 T継手のマクロ組織

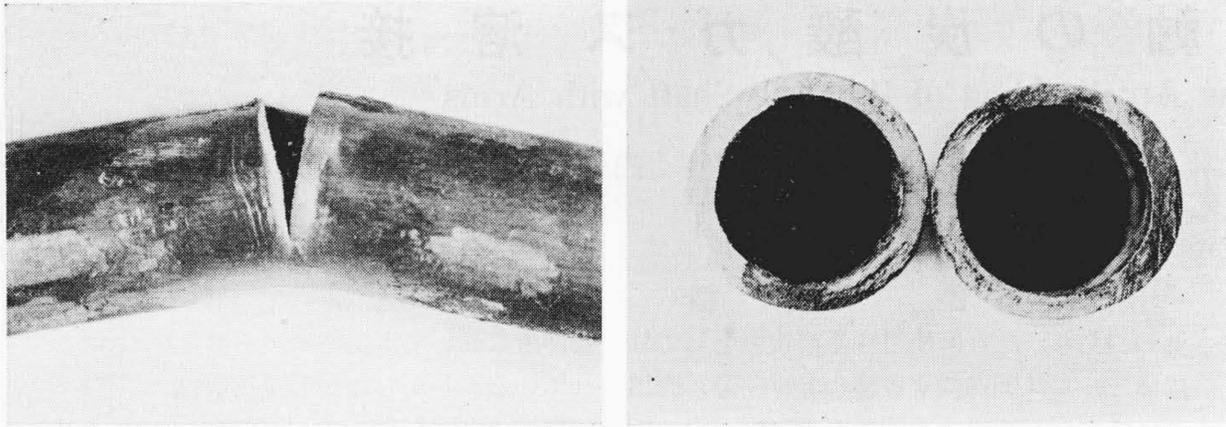


第10図 T継手の疲れ破壊状況

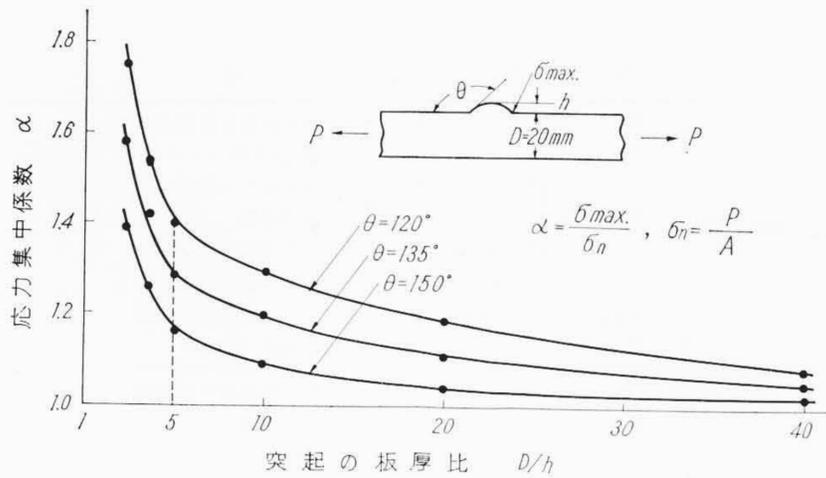


第11図 管継手のS-N曲線

形状による応力集中が疲れ強さに利いたものと考えられる。Newman氏⁽⁴⁾の実験によるとビード余盛りを削除しないものでもルート部よりき裂が発生しており、その部分の欠陥は著しい強度低下をまねくところから、管の突合せ継手ではとくに入念に溶接する必要がある。初層ヘリアーク溶接では裏ビードが部分的に大きく溶け出しているため、裏波溶接より強度が低くなったものと考えられ、管内の蒸気などの流れの抵抗を小さくする上からも溶け出し量を少なくすることが好ましいといえる。



第12図 管継手の疲れ破壊状況



第13図 引張り応力を受ける円弧状突起部の応力集中

管継手の場合曲げ試験を行なったが、薄肉管では部分的には引張り応力を受けるものとみなされ、さきに述べた突合せ継手においてもビード余盛りが疲れ強さに影響したことなどから、円弧状突起のある板を引張った場合の応力集中係数を光弾性実験により求めた。Newman, Gurney 両氏⁽¹⁾が両側から溶接した突合せ継手試験片のビード余盛り角を測定し、疲れ強さとの関係を求めているが、本実験では突起高さと同板厚との比を変えて求めた。その結果を第13図に示す。板厚に相当する部分は20mm一定とし突起高さを $D/h=2.5\sim 40$ にえらび、余盛り角は試験片の実測値をもとにしてきめた。突起高さが板厚の20%を越えると応力集中が著しく大きくなる傾向を示すので、薄板の場合には特に余盛り形状に注意を要することがわかる。

ここで各継手形式間の疲れ強さを第3表の疲れ強さの平均値にて比較してみる。T継手が最も強くなっているのは板厚当りの見掛けの応力にて示したためであり、余盛り部を含んだ真の断面当りの応力にて表わすと、第9図の形状で断面係数の増し分から約1/2に低下することになる。第5図の突合せ継手と第9図のT継手の断面形状をみると、T継手の方が鋭い切欠を呈しており、応力こう配からいっても曲げの方が不利になるはずであるためT継手の真の疲れ強さが突合せ継手より低くなることは妥当であると考えられる。次に管継手については、管径と肉厚からみて曲げを受ける管継手と引張りを受ける突合せ継手とは疲れ強さが変わらないと考えられるが、裏波溶接の管継手と初層ヘリアーク溶接の突合せ継手では、前述のように溶接部表面がなめらかになっていたことにより疲れ強さ

が上昇したものと推察される。もちろん、板厚の差とそれによる溶着量の相異その他の影響も考えなければならぬであろう。

以上、各種継手につき疲れ強さを求めた結果、T継手においては大きなばらつきを生じたが、一応おのおのの算術平均値にて比較すると第3表に示すように、裏波、裏当、初層ヘリアーク溶接とも疲れ強さは大差ないようである。しかし全試験片とも溶接部の表面形状により強度差を生じることから、

その部分の応力集中が小さくなるような溶接条件をおのおの場合について研究するとともに、設計に際してはこれらの疲れ強さのばらつきを考えて安全率をきめる必要がある。

4. 結 言

深溶け込み溶接棒による裏波溶接法と従来より行なわれている裏当溶接および初層ヘリアーク溶接法とによって溶接された場合の疲れ強さの比較を、突合せ、Tおよび管継手試験片により行なった結果次のような結論を得た。

裏波溶接の疲れ強さは裏当溶接、初層ヘリアーク溶接とほとんど差がないものと考えられる。しかし、溶接施工法により強度のばらつきがみられ、突合せ継手においては初層の溶け出し部や余盛り部の形状による応力集中、T継手では初層側が引張りになるような片振り曲げ試験を行なったのであるが、その初層部の形状すなわち裏波溶接の溶け出し部とウェブ側母材との趾端部の形状や裏当溶接での裏当金の取り付け状態などにより疲れ強さが増減する。

管継手ではルート溶け出し部が応力集中をまねき、余盛り部をグラインダ研削したことにもよるがすべてき裂は管内面より発生した。この種円弧状突起部の引張り応力下の応力集中係数は第12図に示すようになり、板厚の20%を越えると著しく応力集中が大きくなるので注意を要する。

以上、代表的継手形状についての疲れ強さの比較を行なった結果、強度上一応裏波溶接を安心して各種突合せ継手に実用できることがわかった。しかし、T継手のように溶着金属の表面形状により強度差を生じることからみて、裏波溶接条件についてはなお今後の作業上の検討が必要である。

終わりに、本研究の遂行にあたりご指導とご協力をいただいた日立製作所亀有工場牧課長をはじめ社内各工場の関係各位、ならびに実験に協力された日立製作所日立研究所榎本、横田両君に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) R. P. Newman, T. R. Gurney: Brit. Weld. J., 6, 569 (Dec. 1959)
- (2) G. Becker, R. Rieger: Schweisstechnik., 3, 12, 363 (Dec. 1953)
- (3) 多田, 立花, 寺尾: 溶接学界誌 30, 387 (昭36-6)
- (4) R. P. Newman: Trans. Inst. Mar. Eug., 68, 153 (1956)