

(昭和 36 年 5 月造船協会春季講演会において講演)

線状加熱による曲げ加工が鋼材の脆性破壊 伝播特性におよぼす影響

正員 橋 本 敏 郎*

正員 前 田 豊 生**

Effect of Bending by Line Heating Method on Brittle-Fracture
Propagation Characteristics of Steel Plates

By Toshiro Hashimoto, *Member*
and Toyoo Maeda, *Member*

Summary

One of the authors has previously published the detailed procedures for plate bending by Line Heating Method, and showed its great promises for bending the steel ship hull plates. This method, which is consisted of heating and subsequently water-cooling a steel plate, has been suspected by not few concerned as possessing harmful effects on material properties. However, it was then proved by various tests such as static-tension, bending, V-notch Charpy and hardness tests or micro-structure inspection, that the effect on material is as slight as that caused by press-bending in either cold or hot state, because the heating in this process is duly controlled so as not to heat the plate beyond A-1 transformation point of steel.

Recently, a number of large-scale brittle fracture tests, which is believed to have good correlation with brittle fracture of actual steel structures, has been developed. A Double-Tension test is one of the most representative of these large-scale tests, and the brittle-fracture properties of steel plates bent by Line Heating Method was investigated with this test by the present authors, the results of which are reported in this paper. It was revealed that the heated zone of steel plates becomes indeed more brittle than the original material, but the degree of deterioration is almost same as that caused by press-bending; in other words, Line Heating Method can safely be used for ship hull steel plates from the viewpoint of brittle fracture.

It was also found that the shear-fracture transition-temperature by Pressed-notch Charpy test is highly correlated with the arresting-temperature obtained by the Double-Tension test, if the applied stress is nearly as high as the yield point of the material.

1 緒 言

線状加熱板曲げ加工法の具体的な方法とその効果については、さきに著者らの1人が報告したところであるが¹⁾²⁾³⁾、線状加熱曲げ加工法は他の曲げ加工法とことなり、鋼材を加熱した後水冷する方法であるので、加工される鋼の材質に対して悪影響があるのではないかと懸念が、この加工法の採用当初にもたれたのは無理からぬところであつた。実際には、加熱が鋼材の A₁ 変態点以下で行なわれるから、材質におよぼす影響はきわめて少なく、線状加熱曲げ加工によつて鋼材が材質的に劣化する度合は、同量の曲げを冷間あるいは熱間プレスで与えた場合とほとんど同程度であることが、静的引張、曲げ、Vシャルピ衝撃、硬さ、顕微鏡試験などによつて明らかにされている⁴⁾⁵⁾。

原稿受付 昭和 35 年 12 月 20 日

* 石川島播磨重工業株式会社 船舶事業部

** 石川島播磨重工業株式会社 技術研究所

しかしながら、船舶の脆性破壊防止の見地からすれば、これらの小型試験の結果のみによつて判断することには若干の不安があるとする向きがあつた。そこで、線状加熱曲げ加工法を船体用鋼板に対して行なうことの妥当性を大型試験によつてたしかめる目的で本研究を行なつたのである。

脆性破壊に関する大型試験としては、脆性亀裂の発生特性をしらべる ESSO 試験、および木原教授らの考案による溶接残留応力を利用して脆性亀裂を発生させる大型引張試験と、伝播特性をしらべる Robertson 試験、および二重引張試験などがあるが、われわれは伝播特性をしらべる二重引張試験を行なうこととした。

この研究の結果、さきに行なつた小型試験の場合と同様の結論が、大型試験によつてもえられることをたしかめることができた。すなわち、線状加熱を行なうと、加熱された部分は若干脆化し、母材にくらべて脆性亀裂伝播停止温度は上昇するが、その程度は冷間曲げを行なつた場合と同程度であつて、線状加熱は適正条件で行なわ

第1表 供試鋼材の性質

鋼種	厚 mm	化学成分 %					機械的性質				
		C	Si	Mn	P	S	降伏点 Kg/mm ²	引張強さ Kg/mm ²	伸長率 GL50 ^{mm} %	Vシャルビ Trs °C	Tr15 °C
B	20	0.12	0.19	0.92	0.02	0.025	28.9	44.5	40	6	-20.5
C	26	0.14	0.11	0.61	0.03	0.030	28.2	42.5	50	6.5	-21.5

* Trs, Tr15 は焼準したものの値である。

(以下単にそれぞれ鋼材 B, C と記す)。これらの化学成分および機械的性質は第1表のとおりである。

れば、冷間曲げと同様安全に船体用鋼板の曲げ加工に使用しうることが明らかにされたのである。以下にその概要をとりまとめて報告する。

2 供試鋼材

この研究にもちいた鋼材は、AB 規格の船体用鋼板として購入した ABS-B 材、厚さ 20mm、および ABS-C 材、厚さ 26mm の2種である。

3 実験方法

3.1 実験した曲げ加工の方法と条件

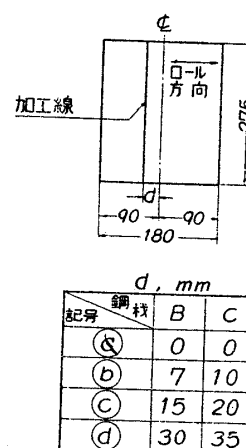
現在工場で実際に行なっている線状加熱曲げ加工には、拘束しない自由な板を加熱する線状加熱自由曲げと、適当な拘束治具をもちいて予めある大きさの曲げ応力を加熱線上に機械的に与えておき、その状態で加熱を行なつて大きい曲り量をうる線状加熱拘束曲げとがある。われわれの実験では、これらの方法のほか、同一線上を繰返し加熱する繰返し線状加熱、冷間プレス曲げおよび熱間プレス曲げを行なつて、これら各種の曲げ加工が鋼材の脆性破壊伝播特性におよぼす影響をしらべた。各鋼材に対して行なつた曲げ加工の条件を第2表に示す。

線状加熱における加熱条件はすべて一定にしたので、板厚の相異、拘束あるいは繰返しの有無によつて曲がり量はことなつた値を示している。これらの条件を、実際に造船の現場で採用されている加熱条件と比較すると、B 材については加熱速度が実際に行なわれているもつとも遅いものよりもさらに遅く、従つて実際よりも材質に対する影響が大きくあらわれるような条件である。また C 材に対する加熱条件は実際に用いられる加熱条件のうちでもつとも速度が遅く、材質に対する影響がもつとも大きいものである。

また、冷間プレス曲げ (I) は線状加熱自由曲げと、冷間プレス曲げ (II) と熱間プレス曲げは線状加熱拘束

第2表 曲げ加工条件

鋼材	符号	加工法	曲げ半径 R (mm)	酸洗圧力 Kg/cm ²	素焼流量 m ³ /hr	アセチレン圧力 mmHg	アセチレン流量 m ³ /hr	火口と板との 距離 (mm)	冷却水量 l/min	速度 mm/sec	拘束曲げ 応力 Kg/mm ²
B	B0	加工せず	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	BL1	線状加熱自由曲げ	95	4.1	2.18	110	1.77	16	2	7	0
	BL2	線状加熱拘束曲げ	130	4.1	2.18	110	1.77	16	2	7	-8
	BL3	5回繰返し線状加熱	325	4.1	2.18	110	1.77	16	2	7	0
	BC1	冷間プレス曲げ (I)	95	—	—	—	—	—	—	—	—
	BC2	冷間プレス曲げ (II)	130	—	—	—	—	—	—	—	—
	BH2	熱間プレス曲げ	130	—	—	—	—	—	—	—	—
C	C0	加工せず	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	CL1	線状加熱自由曲げ	60	4.1	2.18	110	1.77	16	2	7	0



第1図 加工線の位置

曲げと、それぞれ曲がり量が等しくなるようにした。なお実際にはまず試験片に予定の曲がり量を与えた後、焼準して曲げ加工の影響を除き、これを第2表の条件で加工することにより平らにしたものを二重引張試験に供したのである。曲げ加工を行わない試験片も同じ条件で焼準した。曲げ加工線の向きは、二重引張試験の脆性亀裂伝播方向と平行にし、加工線からの距離による鋼材の脆化の程度をしらべるために、加工線の位置を第1図のように選んだ。

3.2 二重引張試験

上述の加工を行なった試験片を第2図の寸法に加工して二重引張試験に供した。試験装置としては、主荷重装置に200トンアムスラー引張試験機をもちい、脆性亀裂を発生させるためには20トンオイルジャッキ2コを有する副引張装置を50トンアムスラー引張試験機によって作動させた。

第2図の試験片の切欠底部に予め角度 35° のナイフエッジを深さ3mm圧入した後、試験片の両端にチャックプレートと溶接し、これを200トン引張試験機にとりつけた。しかる後、試験片の部分を恒温槽で囲み、槽内温度を所定の値に20分以上保持した後、荷重をかけて試験を行なった。亀裂発生部の温度は -75°C 、伝播部の温度は $-40\sim+35^\circ\text{C}$ 、試験応力は $6\sim 25\text{ kg/mm}^2$ とした。

3.3 プレスノッチシャルピ試験

一部の試験片については、プレスノッチシャルピ試験を行なって二重引張試験の結果と比較した。試験片寸法は標準の10mm角試験片の角度 45° のナイフエッジを深さ2mm圧入したものとし、プレスノッチ加工後直ちに衝撃試験を行なった。

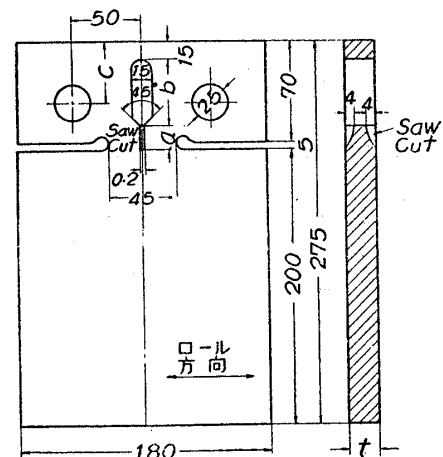
4 実験結果と考察

4.1 試験片の温度分布

二重引張試験における亀裂伝播部の温度と恒温槽の温度とは必ずしも一致しない。特に亀裂発生部が -75°C に冷却されているため、その付近では温度分布が一定にならない。そこで試験片の温度分布をしらべるために、中心線上で板厚中心に9点板の表面に1点、銅コンスタンタン熱電対を溶接し、亀裂発生部の恒温槽内の温度を $-75\pm 2^\circ\text{C}$ 、亀裂伝播部の槽内温度をそれぞれ -40 、 -20 、 0 、 $+10$ 、 $+20^\circ\text{C}$ としたときの試験片の温度分布を測定した。測定結果の1例は第3図のごとくで、亀裂伝播部にもかなりの温度勾配があり、試験結果を考察する際に温度分布を考慮する必要があつた。板厚中心と表面との温度差はほとんどなかった。

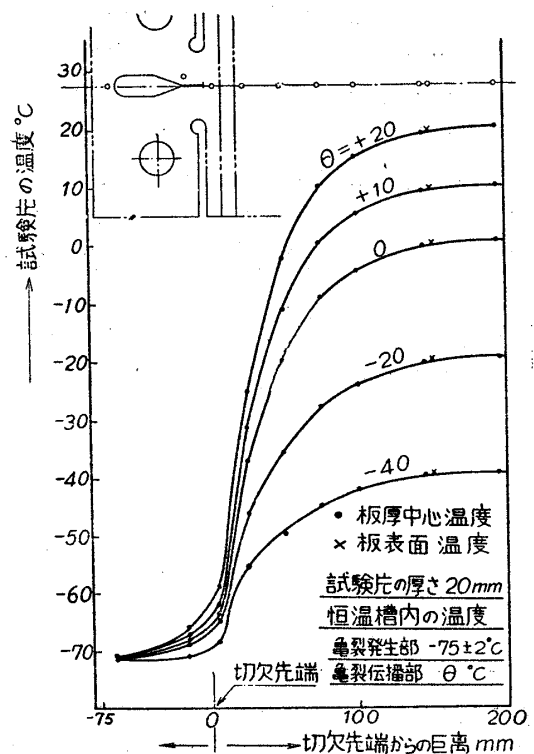
4.2 亀裂伝播部の応力分布

試験片に主荷重、副荷重あるいはその両者を負荷したときの応力分布をしらべるために、中心線上の表裏各8点ずつ、計16点に抵抗線歪計を接着し、主荷重装置による試験応力の値をそれぞれ10、15、20 kg/mm^2 とし副荷重をかけない場合、および試験応力を0、10 kg/mm^2 とし副荷重装置に6トンの引張力を加えた場合の応力分布を測定した。その結果の1例は第4図のごとくで、亀裂発生部の切欠切端から20mm以内では応力値が低くなっているが、30mmをこえるとほとんど一様な応力

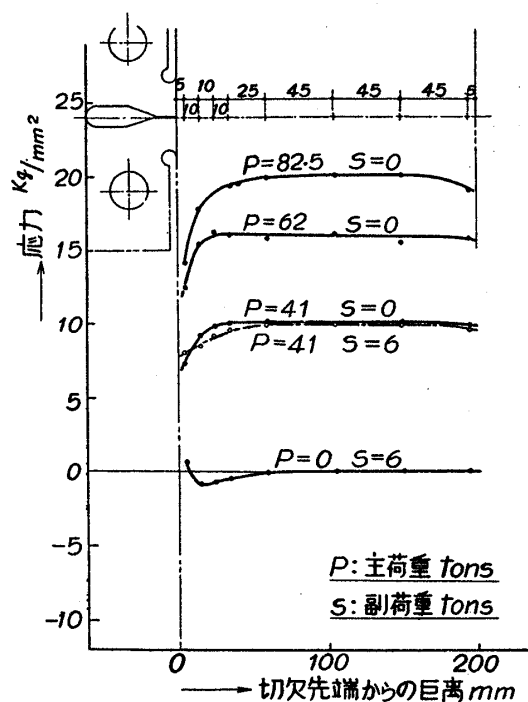


t	a	b	c
20	16	44	45
26	20	40	42

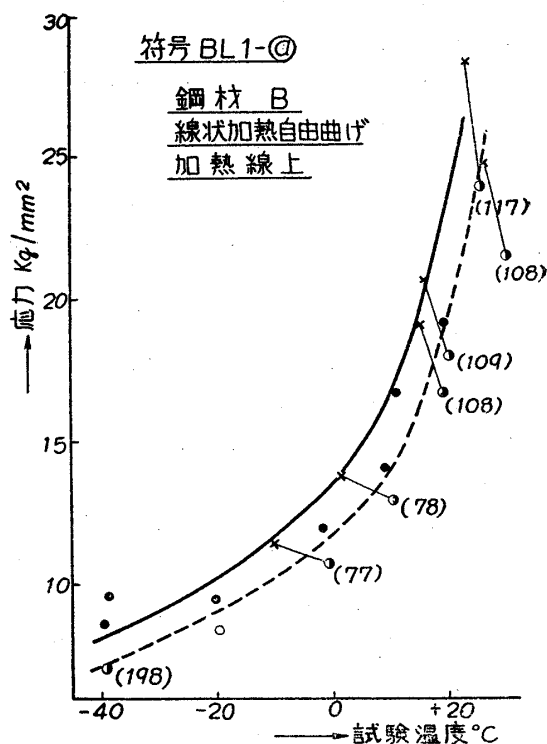
第2図 二重引張試験片の寸法



第3図 試験片の温度分布



第4図 亀裂伝播部の応力分布



第5図 二重引張試験結果

分布となっており、試験結果を考察する際特に問題となることはなかった。

4.3 脆性亀裂の伝播停止温度

第5図は鋼材Bの試験片の中心線上 ($d=0$ mm) に線状加熱自由曲げを行なったもの (符号 BL1-③) の二重引張試験の結果を示すものである。図の横軸に恒温槽内の温度、縦軸に試験応力をとって試験結果を次のようにプロットした。

- ……亀裂が伝播しなかつたもの
- ……亀裂の伝播が試験片の途中で停止したもの
- ……亀裂が試験片の全幅を伝播して破断してしまったもの

●に付記した () 内の数字は亀裂の伝播した長さを示す。

この試験では、4.1 に述べたように、試験片幅のかかなりの部分に温度勾配があつたので、亀裂が試験片の途中で停止したものが多数えられた。これらに着目するに、第5図の横軸は恒温槽内の温度を示しているので、●の温度をそのまま脆性亀裂の停止温度とすることはできないが、第3図によつて亀裂が停止した位置における試験片の温度を求めることができる。

また伝播が停止した瞬間の Applied Stress は、この試験のように試験片の幅が比較的小さいときは、無限幅の場合とはことなつた値となるので、実際の構造物との対応を考えるとときは補正する必要がある。われわれは吉識教授らに従つて⁶⁾

$$\sigma_{cr} = \sqrt{2 \tan(\pi\alpha/2) / \pi\alpha} \cdot (\sigma_{cr})_B$$

ただし、 σ_{cr} = 無限幅のときの限界応力

$(\sigma_{cr})_B$ = 有限幅 B のときの限界応力

$\alpha = C/B$ = 亀裂の長さ/試験片の幅

として Applied Stress の値を補正した。

このように温度と応力に対する補正を行なつて第5図の●のデータをプロットしなおすと×で示すような点がえられる。これらの点はある Applied Stress における脆性亀裂の伝播停止温度を示すものであつて、これらの点を結ぶ曲線 (図中の実線) は脆性亀裂の伝播停止曲線である。

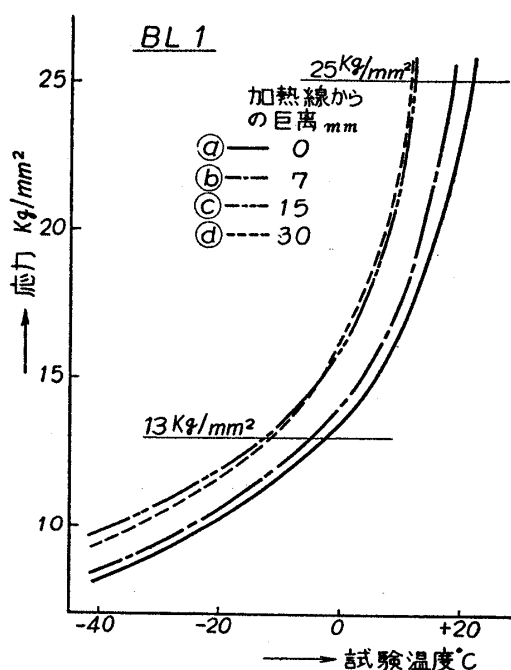
同じようにして、おのおのの条件で曲げ加工を行なつた各鋼材の、加工線からの距離 d がそれぞれの値をもつ

位置についての伝播停止曲線を求めたのであるが、たとえば鋼材 B に線状加熱自由曲げを行なったもの（符号 BL 1）の $d=0, 7, 15, 30$ mm における伝播停止曲線を図示すると第 6 図のようになる。この図をみると、加熱線から 7 mm までの範囲は加工の影響をうけて幾分脆化し、伝播停止曲線が高温側に移っているが、加熱線から 15 mm 離れれば加工の影響はなくなっていることがわかる。

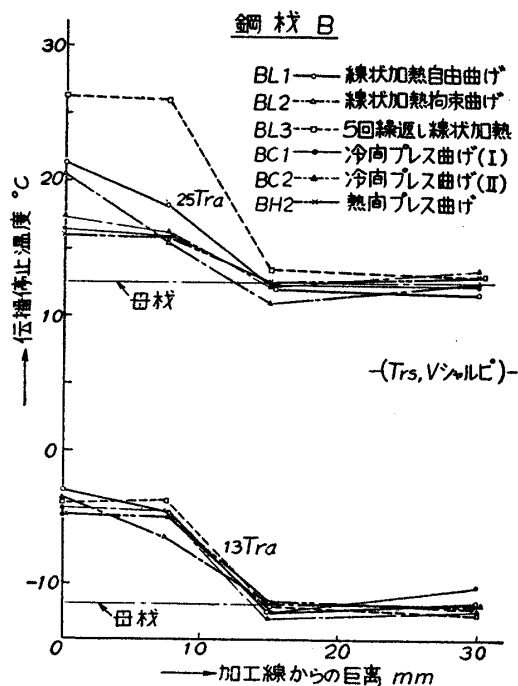
この種の鋼の許容応力は通常 $10 \sim 13 \text{ kg/mm}^2$ 程度の値が採用され、また降伏点は 25 kg/mm^2 程度として設計されることが多い。第 6 図において、応力 13 kg/mm^2 の水平線をひき、それが伝播停止曲線と交わる点の温度を求めると、その温度は Applied Stress が 13 kg/mm^2 のときの脆性亀裂の伝播停止温度と考えることができる。これを $_{13}\text{Tra}$ であらわすことにする。Applied Stress 25 kg/mm^2 に対しても同様な伝播停止温度が求められるが、それを $_{25}\text{Tra}$ であらわすことにする。そうすると、各鋼材のおおのの曲げ加工条件に対する伝播停止温度が第 7, 8 図のようにあらわされる。

第 7 図によつて曲げ加工の条件が鋼材 B の脆性亀裂伝播停止温度におよぼす影響を検討してみると、加工の影響が最も著しいのは当然のことながら加工線上であることが示されている。そこでこの線上で伝播停止温度をしらべてみると、Applied Stress が降伏点に近い大きな値である場合には、線状加熱を 5 回繰返したものは他に比較してこの温度が稍高いが、その他は加工条件の影響がほとんどなく、また Applied Stress が設計応力付近の値ならば、繰返し線状加熱したものも他の曲げ加工を行なったものも、伝播停止温度には全く差がみとめられない。また第 8 図によると、線状加熱が鋼材 C に与えた影響は僅小であつた。

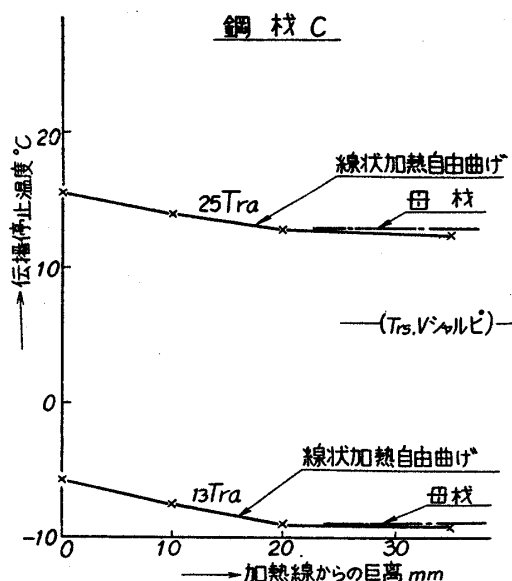
なお第 5 図で温度と応力に対する補正を行なわないで○、●と●との境をとる曲線（図中の点線）をひいてみると、これはこの試験片に実現された温度一応力場において脆性亀裂が試験片の全幅を横切つてしまうか否か



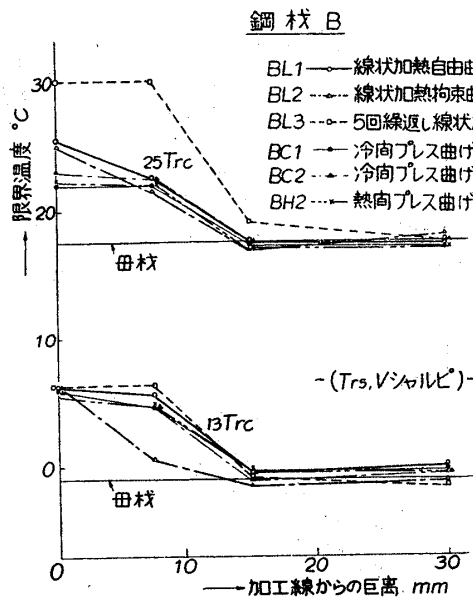
第 6 図 脆性破壊伝播止曲線



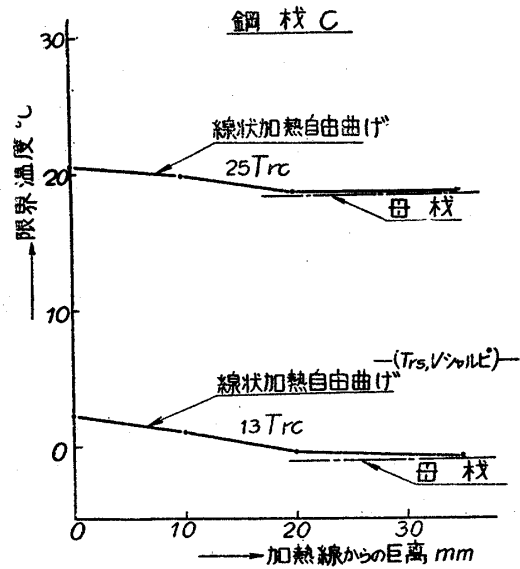
第 7 図 脆性破壊伝播停止速度



第 8 図 脆性破壊伝播停止温度



第9図 脆性破壊伝播限界温度



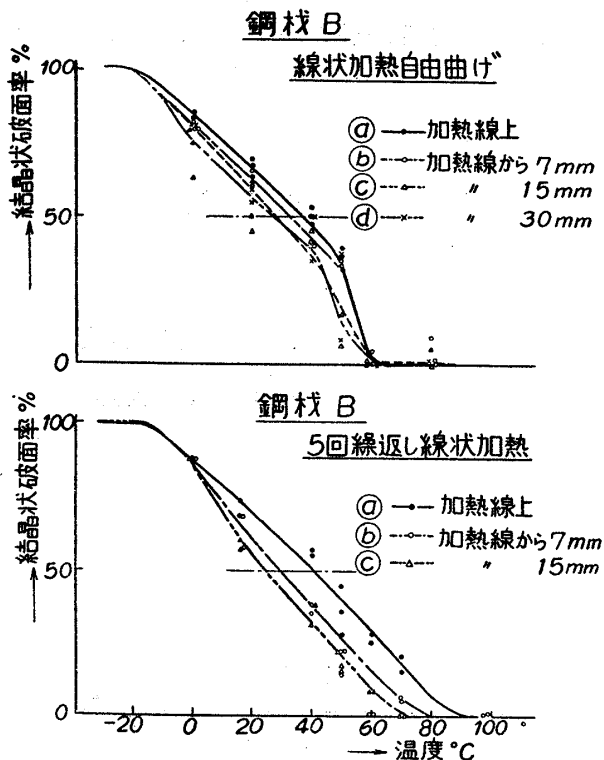
第10図 脆性破壊伝播限界温度

の限界を示す曲線となる。このような曲線の位置は試験片の幅、温度分布などによつて変るものであるから、温度、応力の補正を行なつて求めた脆性亀裂伝播停止曲線のような普遍的な意味はもたないが、この試験の目的とした曲げ加工法の影響を比較するための一つの尺度として使用するこはと許されるであろう。伝播停止温度 (σ_{Tra}) を求めたのと同じ手続でここにいう意味での限界を示す温度 (σ_{Trc}) を求めると第9, 10図のようになり、曲げ加工の影響については、伝播停止温度について考察した場合と全く同じ傾向がみられる。

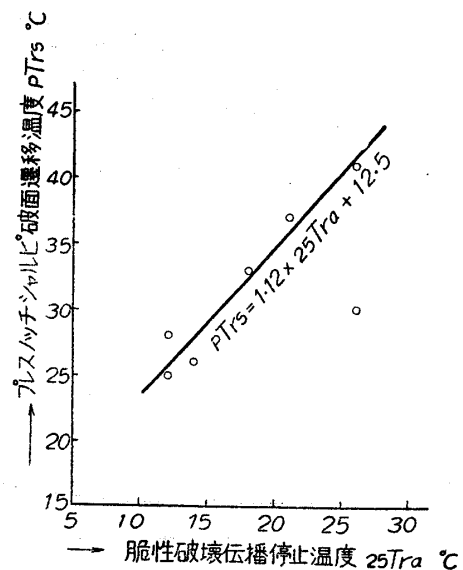
参考のために、標準Vシャルビ衝撃試験による母材の破面遷移温度 Trs をも第7~10図に示した。

4.5 プレスノッチシャルビ試験の破面遷移温度 (pTrs)

プレスノッチシャルビ試験は、他の多くの工業的試験と同じように general yield 型の破壊試験であるので、



第11図 プレスノッチシャルビ試験結果

第12図 pTrs と $25Tra$ の関係

低応力破壊を起させる二重引張試験とは、本質的にはことなる試験であるが、両試験によつてえられる特性値の間には相当高い相関があるといわれているので、この実験でも若干のプレスノッチシャルピ試験を行なつた。第 11 図の曲線はおのおのの試験温度における結晶状破面率を示すものである。この図から、50% 結晶状破面率を示す温度 pT_{rs} を求め、さきに二重引張試験によつて求めた脆性亀裂伝播停止温度 $2sT_{ra}$ との関係を図示すると第 12 図のようになる。図中に 1 つだけ他とかけはなれた点があるが、その理由は不明である。一応これを考慮の外におき他の 6 点について回帰直線をひいた。この図でみると、Applied Stress を相当大きくとつた場合の伝播停止温度と、プレスシャルピ試験でえられる破面遷移温度との間にはきわめて高い相関があるように思われる。

5 結 論

線状加熱による鋼材の脆化の程度は、Vシャルピ衝撃試験、硬度試験などによつてしらべたところでは、冷間で同量のプレス曲げを行なつた場合と大差のないことがすでにたしかめられていた。今回実際の構造物との対応がすぐれている低応力破壊型の大型試験によつてこれをたしかめるため、二重引張試験を行なつた。最初は温度勾配をつけない方式で行なう予定であつたが、試験片の幅が比較的小さかつたために、温度分布が試験片幅のかんりの部分で一様にならなかつた。また応力場も脆性亀裂の進行に伴つて無限幅の場合とはことなつて来る。従つて試験応力と温度をそのままプロットしてえられる曲線は、この試験で実現されたような温度一応力の場合、脆性亀裂が伝播してしまうか否かの限界を示すものとなつた。この曲線は試験片の幅や温度分布によつて変化するから、実際の構造物における脆性破壊伝播の限界と直接の対応をつけることはできないが、曲げ加工の方法、条件などの影響を比較するための一つの尺度として用いることは許されよう。

一方試験片に温度勾配があるので、亀裂を途中で停止せしめることが可能で、そのような試験片が多数えられた。これに着目して、亀裂停止点における試験片の温度を測定し、応力値については試験片幅に関する補正を行なつて無限幅の場合に換算することにより、実際の構造物の破壊と直接対応する脆性亀裂の伝播停止温度を求め、これによつて曲げ加工の方法および条件が鋼材の脆性破壊伝播特性におよぼす影響を検討することができた。

実験の結果を総合すると次のようになる。

1. 線状加熱、冷間あるいは熱間プレスによつて、脆性亀裂の伝播方向と平行に鋼材に曲げ加工を行なうと、いずれの場合も加工部は原質部より若干脆化し、脆性破壊伝播特性にその影響があらわれている。
2. 通常の設計応力程度の Applied Stress では、脆性破壊の伝播特性、すなわちこの試験で求めた脆性亀裂の伝播停止温度に対する曲げ加工の方法、条件の影響の差はみとめられなかつた。

実際の構造物における脆性破壊の伝播は Applied Stress が設計応力に等しい場合を考えておけばよいから、線状加熱を行なつた材料の構造物材としての脆性破壊伝播に対する安全性はプレス曲げを行なつたものと差異がない。換言すれば、構造物材の曲げ加工法として、線状加熱を冷間あるいは熱間曲げと同じように採用実施してなら懸念のないことが、小型試験の場合と同様二重引張試験によつても立証されたのである。

3. Applied Stress の値が降伏点に近い大きな値になると、脆性亀裂の伝播停止温度は、曲げ加工の方法および条件によつて若干の差を生ずることがみとめられた。脆化の程度は

(1) 同一線上を 5 回繰返し線状加熱したもの

がもつとも著しく、ついで

(2) 線状加熱自由曲げ、線状加熱拘束曲げ

で、もつとも脆化の程度のすくないのが

(3) 冷間プレス曲げ (I)、(II) および熱間プレス曲げ

であつた。線状加熱の自由曲げと拘束曲げ、冷間プレス曲げの (I)(II)(加工度の小さいものと大きいもの) と熱間プレス曲げ、の間にはそれぞれほとんど差がなかつた。(2) と (3) すなわち 1 回線状加熱と冷間あるいは熱間プレス曲げとでは、伝播停止温度で約 3°C という僅少な差しかない。(1) と (3) すなわち 5 回繰返し線状加熱を行なつたものと冷間あるいは熱間プレス曲げを行なつたものとの間には、伝播停止温度で約 7°C の差がある。

実際の構造物には平均応力が降伏点に近いような応力場はないと考えてよいから、実用的には高応力場におけ

る伝播停止温度の差異を考慮する必要はないといえよう。

4. 今回行なつた試験でえられた脆性破壊伝播停止温度は $\text{Applied Stress}=13 \text{ kg/mm}^2$ の場合、もつとも条件のわるい5回繰返し線状加熱を行なつたものでも -4°C であつた。この値は船体用としては十分安全な値と考えてよい。勿論停止温度は母材によつて定まるものであるから、母材の選択に注意しなければならないが、線状加熱を行なう場合も冷間あるいは熱間プレス曲げを行なう材料と同様に考えてよいことが明らかとなつた。

5. 二重引張試験でえられる高応力場での脆性亀裂伝播停止温度と、プレスノッチシャルピ試験でえられる破面遷移温度との間には、今回の実験でもきわめて高い相関があることがみとめられた。

後 記

本研究の実施にあたり終始御懇篤な御指導を賜つた東大吉識、金沢両教授、有益な御示唆をいただいた東大木原教授、日本鋼管鶴見造船所越賀房夫氏、石川島播磨重工中村技研所長に厚く感謝申し上げますとともに、実験を遂行した石川島播磨重工技術研究所松岡忠博、和田完一、船舶事業部村上健助、神吉郁男の各氏らの労に深く謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 石川島技報 第 35 号, 昭和 29 年 10 月, 54-62
- (2) 橋本敏郎, 藤城能教: 造船協会論文集 第 104 号, 昭和 34 年 1 月, 201-225
- (3) 橋本敏郎: 石川島技報, 橋梁道路特集号, 昭和 35 年 10 月, 56-68
- (4) Ishikawajima Heavy Industries Co., Ltd.: Plate Bending by Line Heating Method, 1956
- (5) 橋本敏郎, 石井栄治, 柏 史郎: 石川島技報 第 40 号, 昭和 31 年 1 月, 70-76; 第 41 号, 昭和 31 年 4 月, 71-79
- (6) 日本造船研究協会報告 第 30 号, 昭和 35 年 10 月, 72