(昭和36年5月造船協会春季講演会において講演)

高温予歪が鋼の切欠靱性におよぼす影響

正員 寺沢 一雄* 正員 大谷 碧*
正員 吉田 俊夫** 正員 寺井 清**

Effect of High Temperature Prestraining on Notch Toughness of Steel

By Kazuo Terazawa, *Member* Midori Ōtani, *Member*
Toshio Yoshida, *Member* Kiyoshi Terai, *Member*

Summary

An extensive investigation was performed about the effects of high temperature prestraining on the notch toughness of a killed mild steel by using the standard V-notch, 2mm U-notch and press-notched Charpy impact specimens.

It was suggested after examining the test results that the characteristics of notch toughness in steel thus treated could generally be comprehended by selecting three criteria in the standard V-notch Charpy test, the maximum energy absorbed ($E_{max.}$) and 50% shear transition temperature (Tr_s) as the measures representing the behavior of notch toughness in the high temperature range, and 15 ft-lbs transition temperature (Tr_{15}) as to the ductility transition phenomenon in the low temperature.

The notch toughness was scrutinized by using those three criteria, and it was found that it decreased remarkably as the amount of prestraining increased up to about 40% (in natural strain), over which the embrittlement became nearly saturated. The harmful effect of prestraining was more remarkable in Tr_{15} than Tr_s and it was conspicuously marked after the prestraining at 200°C. The value of Tr_{15} became about 200°C higher than that of the base metal in the worst case. Less adverse effect was recognized by the prestraining in higher temperature, and in 600°C the embrittlement was hardly seen after prestraining. Whereas the effect was nearly unrelated to prestraining temperatures in the behavior of $E_{max.}$ value.

Moreover, it was proved that the compressive prestraining affected the notch toughness in nearly the same way as tensile prestraining.

As described in the Appendix, the role of aging was investigated by comparing the effects of high temperature straining followed by heating at the prestraining temperature with that of aging after room temperature prestraining under various heating times from 2 minutes to 24 hours. As the results it was found out that the greater part of the embrittlement, caused in excess by high temperature prestraining as compared with room temperature treatment, was of the nonaging-type and the remainder was the one due to strain-aging. It was also found that the speed of strain-aging in mild steel was unexpectedly rapid, and the aging was presumed to conclude almost in only a few minutes.

1 序 言

さきに筆者らは、溶接船体が低荷重のもとに脆性破壊した原因を知るためには、各種の高温で予歪を受けた鋼

原稿受付 昭和35年12月20日

* 大阪大学工学部

** 川崎重工業 K.K. 造船工作部

材の靱性と切欠感度に関する資料を整備する必要があることを指摘して、まず高温予歪処理がその残留延性におよぼす影響を明らかにした⁽¹⁾。本報告はさらに高温予歪処理が切欠感度におよぼす影響を、シャルピー衝撃試験によって実験的に検討したものである。

2 試験方法

2.1 使用材料

試験に使用した鋼材は、板厚 25 mm の造船用キルド鋼（圧延のまま）で、その諸性質は Table 1 のごとくである。化学成分と機械的性質および結晶粒度などの値は、供試鋼が標準的なキルド軟鋼であることを示している。

なお本鋼材は、筆者らが残留延性の研究に用いたものと同一である。

2.2 試験の概要

上述の試験材から、第1次の機械加工により予歪処理用の試験片を採取し、既報⁽¹⁾の要領に準じて室温（約20℃）から600℃までの温度に加熱保持しながら、比較的短時間で引張ならびに圧縮予歪処理を行なつて空冷した。さらに第2次の機械加工によつて、これからシャルピー試験片を削り出して衝撃試験を行ない、高温予歪処理が切欠靱性に与える影響を検討した。

シャルピー衝撃試験片のノッチ形状には、標準V型と2mm U型およびプレス・ノッチの3種を選んだ。まず標準のVノッチ試験片によつて、実験を行なつた予歪温度と予歪量の組合せのすべてに対して遷移曲線を求めることとした。また最近の研究^{(2),(3)}によれば、Uノッチあるいはプレス・ノッチ試験片は、それぞれ脆性破壊の発生または伝播の特性を、Vノッチ試験片より一層的確に表現するとされていることを考慮して、予歪温度と予歪量の代表的な組合せについて、これらの試験片によつても遷移曲線を求め、さらにほとんどすべての組合せの引張予歪処理に対し、Uノッチ試験片を用いて延性遷移温度を求めて、標準のVノッチ試験の結果と併せて検討することとした。

これらの試験方法の詳細を、引張予歪処理と圧縮予歪処理の場合に分けて以下に述べる。

Fig.1 Details of prestraining specimen (prestrain: tension).

Table 1 Steel tested.

Chemical analysis							
C	Si	Mn	P	S	Total O ₂	Total N ₂	AlN
0.14	0.20	0.60	0.018	0.024	0.0090	0.006	0.0015

Mechanical properties (JIS No.4 specimen)

Y. P. (kg/mm ²)	T. S. (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
24.5	44.9	40.0	67.1

(Austenite grain size: 8~6)

(X100)

(Ferrite grain size: 6)

(X200)

2.3 引張予歪を与える場合

(1) 試験片

Fig.1 に示すように、引張予歪を与える試験片の平行部は、断面の辺長が 14 mm の角棒である。また両端のつかみ部は直径 19 mm の丸棒状とし 50 mm にわたつてネジを切つて、これを加熱用チャックに取付ける。なお試験片は鋼板のロール方向に採取した。

(2) 引張予歪処理

予歪温度は室温・100・200・300・400・500・600℃ の 7 種とし引張予歪量 (ϵ_n) は自然歪であらわして 0・2・5・10・22・35・50・70% の 8 種を標準とした。また予歪温度と予歪量

の組合せは Table 2 のごとくした。すなわち、残留延性試験の成績と若干の予備実験の結果を参照して、予歪温度は切欠靱性が著しく低下すると思われる 200°C および 300°C を中心として選び、これに比較の基準となる室温を加えた。また予歪量は同様に予備試験の結果を参照して 10% と 70% を中心として選んで、予歪温度と Table 2 のように組合せた。これらの各組合せに対して 21 本ずつの予歪試験片を準備し、後述の要領で予歪処理してから V シャルピー試験片を削り出した。その採取要領は Fig. 1 中に示す通りで、ノッチの位置が断面収縮の中央にくるとし、かつノッチはすべて板厚方向となるようにした。

Table 2 Combinations of amount and temperature of prestraining for V-Charpy impact test.

Temp. (°C)	ϵ_n (%)							
	0	2	5	10	22	35	50	70
20 (R.T.)	○	○	○	○	○	○	○	○
100				○				
200	○	○	○	○	○	○	○	○*
300	○	○	○	○	○	○	○	○
400				○				○
500	○	○		○				○
600				○				○

*----- $\epsilon_n = 65\%$

Fig. 2 Temperature-time curves of specimen during tensile prestraining.

を除くすべての V ノッチ試験片での組合せに対して、各 5 本ずつの試験片を準備し、エネルギー曲線の低温側を試験してその延性遷移温度を求めることとした。高温予歪を与えるには、容量 50 t のアムスラー型万能油圧試験機を用いた。残留延性の試験のときと同様に、カレント・トランスを接続した加熱用チャックに試験片を取付け、試験片中に大電流を流して電氣的に試験片を加熱した。Fig. 2 は試験片の表面で測定した加熱冷却曲線であつて、さきの残留延性測定用の試験片とは断面積が若干違つたにもかかわらず、同一な結果となつた。また試験片平行部の表面と内部の温度差を熱電対で測定したものが Fig. 3 である。この温度差を考慮しながら、試験片内部が所定の温度となるように加熱した。なお Fig. 2 に図示するごとく、試験片の温度が予歪温度まで上つてから約 4 min. 保持し、その後に予歪を加えた。予歪を与えるのに要した時間は 4 min. 以内であつた。

300°C で 10% と 70%、および基準となる室温で 0・10・70% の予歪を与えた鋼材から採取した。採取要領などは V ノッチ試験片と同様である。これらの試験片によつてシャルピー衝撃試験を行ない、予歪処理した鋼材の遷移温度曲線を求めた。

さらに U ノッチ試験片を用いる場合は、予歪量 70%

Fig. 3 Difference between surface and core temperatures of specimen heated for prestraining.

試験片の予歪量は、ダイヤル・キャリパーを用いてその断面積の変化を計り、体積一定の条件からこれを荷重方向の歪に換算して求めた。ただし試験片が necking を起すと、最小断面部の各辺はやや凹入して断面積の正しい測定が困難となるが、このときは断面の最小幅を計つて、その面積を算定した。予歪処理に際しては、このようにして予定の予歪量をほぼ正確に与えることができた。なお 200℃ の予歪処理では、70% の予歪は試験片が破断するため与えることができなかったため、その量を 65% に止めた。

予歪処理した試験片から、シャルピー試験片を機械加工して衝撃試験を行なうまでの日数は、いずれも大体一定となるようにしたが、約 10 日を要した。

Fig. 4 Details of specimen prestrained under compression.

圧縮予歪を与えるには前述の電氣的な加熱用チャックを利用できないので、試験片を電気炉に入れて所定の温度になるまで加熱し、炉から取り出して温度が余り変らないうちに、200t 万能試験機で加圧した。この際試験片の温度低下を防ぐため、一定の長さ(55mm)に約 20 sec.

以内で圧縮した。ただし、既報⁽¹⁾のごとく予歪温度が違うと、圧縮した試験片の膨出部の形状がやや異なり、したがって丸棒の初期長さを一定としておいたのでは、予歪量を一定に保つことはできない。しかし本実験では予歪量25%を与えるに必要な初期長さを、各予熱温度に対してあらかじめ求めておいて予歪処理

を行なつたので、ほぼ所定の予歪を与えることができ、その量は 23~26% の範囲にばらついたに過ぎなかつた。

Fig. 5 は予歪試験片の表面で測定した加熱冷却曲線である。また試験片の表面部と内部の温度差は Fig. 3 中に示すごとくであつて、これを考慮して試験片の内部が所定の温度となるように加熱した。また最膨出部の断面積変化を測定して、荷重方向の圧縮歪に換算した。最膨出部の位置は試験片長さのほぼ中央で、これから採取するシャルピー試験片のノッチの位置にほとんど一致した。各予歪温度ごとに 21 本ずつの予歪試験片を準備して衝撃試験片を作り、予歪処理後約 10 日後に衝撃試験を行なつて、それらの遷移温度曲線を求めた。

2.4 圧縮予歪を与える場合

(1) 試験片

圧縮予歪処理は Fig. 4 に示す直径 24mm の丸棒を用いて行い、その中心部から標準 V ノッチ試験片をロール方向に削り出した。引張予歪の場合と同様に、ノッチは板厚方向に付けた。

(2) 圧縮予歪処理

予歪温度は室温・100・200・300・400・500・600℃ の 7 種とし、予歪量は 25% の 1 種とした。予歪処理した鋼材から V ノッチ試験片を採取するためには、予歪後の試験片長さが 55mm 以上なければならず、かつ板厚 25mm の試験材から加工しうる丸棒の径も制限されるので、これより多量の圧縮予歪処理は塑性座屈を生じ、実施不可能であつた。

Fig. 5 Temperature-time curves of specimen during compressive prestraining.

3 試験結果

3.1 引張予歪の影響 (1) V ノッチ衝撃試験

前述の要領で製作した V ノッチ試験片を用いて、吸収エネルギーが飽和してほぼ最大値を示す高温から、これ

Fig. 6 Results of V-Charpy impact test (1) (prestrain: tension).

が脆化して吸収エネルギーがほとんど消失するに至る低温までの温度範囲で衝撃試験を行ない、試験片の衝撃値・剪断破面率・横収縮率を測定した。予歪温度と予歪量の種々な組合せに対して結果を図示すると、Fig. 6 および Fig. 7 がえられる。

まず Fig. 6 は各予歪温度ごとに予歪量が切欠靱性におよぼす影響を示すものである。どの処理温度においても予歪量が増せば、一般に靱性曲線の高さは低くなりかつ高温側に移動して、切欠靱性が低下の現象を示すのは当然であるが、低下の割合は予歪量の少いうちが大きく、予歪量の増加とともに漸次飽和する傾向が見られる。ただし剪断破面率曲線のみは、予歪量が 35% を越すと逆に低温側へ移動する傾向を示しているが、これは後述するとき破面の異常に主として基づくものと思われる (4.2 参照)。次に Fig. 7 は予歪量が 0・10・70% の場合について、予歪温度の影響をあらわしたものである。予歪を与える温度によって、切欠靱性の低下の割合が著しく異なるものであることがわかる。なお Fig. 6 と Fig. 7 中の点は、2～3 本の平均値をプロットしたものである。

Fig. 6 と Fig. 7 の遷移温度曲線から、高温予歪処理が鋼材の切欠靱性におよぼす影響をどのようにして判定するかは、慎重に検討しなければならぬ事項であるが、いまは差当つて従来から慣用されてきた各種の遷移温度、すなわち

Fig.7 Results of V-Charpy impact test (2) (prestrain: tension).

Table 3 Summary of V-Charpy impact test showing the effects of amount and temperature of prestraining in tension.

PREST. TEMP.	PRE-STRAIN (%)	SHAPE OF NOTCH	E_{MAX} (kg-m/cm ²)	ϕ_{MAX} (%)	Tr_{15} (°C)	Tr_{ϕ} (°C)	Tr_E (°C)	Tr_s (°C)
ROOM TEMP.	0	V-NOTCH	16.4	16.5	-27	-35	13	18
	2	"	15.3	7.5	-5	-7	17	20
	5	"	15.3	9.0	8	6	30	30
	10	"	12.4	8.5	15	15	32	33
	22	"	6.8	6.5	25	22	36	55
	35	"	5.0	5.5	45	35	50	70
	50	"	4.3	4.5	34	22	33	(33)
100 °C	70	"	4.1	4.0	30	6	35	(27)
	10	"	13.7	9.1	25	23	40	40
200 °C	0	"	19.0	13.5	-17	-20	20	20
	2	"	16.8	12.5	24	15	52	47
	5	"	12.2	9.0	50	40	70	70
	10	"	11.6	7.0	57	53	74	72
	22	"	8.9	7.3	91	76	104	96
	35	"	5.8	4.5	112	90	120	110
	50	"	2.4	3.5	160<	100	80	(77)
300 °C	65	"	1.8	2.3	160<	100	60	(80)
	0	"	19.0	12.0	-23	-30	13	14
	2	"	15.6	13.0	16	10	47	40
	5	"	13.2	12.5	43	30	65	60
	10	"	12.6	8.0	80	77	100	95
	22	"	12.0	6.5	90	80	118	102
	35	"	8.4	5.5	107	75	130	103
400 °C	50	"	3.5	5.0	100	80	95	(90)
	70	"	2.7	3.5	100	60	72	(70)
	10	"	12.5	6.6	45	45	80	75
500 °C	70	"	3.2	3.9	40	15	40	(30)
	0	"	19.4	12.7	-20	-20	0	5
	2	"	15.9	12.3	-6	-7	10	15
600 °C	10	"	12.3	6.8	14	10	40	45
	70	"	2.4	4.0	55	20	20	(<20)
	10	"	15.3	10.1	2	-5	26	25
600 °C	70	"	5.8	6.0	-25	-30	-10	(-20)

 Tr_{15}15 ft-lbs (2.6 kg-m/cm²) 遷移温度 Tr_{ϕ}2% 横収縮率遷移温度 Tr_E1/2 エネルギー遷移温度 Tr_s50% 剪断破面率遷移温度

の値をそれぞれの曲線より求め、Table 3 に一括して示しておくこととする。また予歪量が大きくて破面が異常を呈した場合の Tr_s は、その値の意義が不明確であるから、括弧中に入れて記入し他のものと区別した。さらに同表中には、

 E_{max}高温側の最大吸収エネルギー ϕ_{max}高温側の最大横収縮率

をもあわせて示してある。

3.2 引張予歪の影響 (2) — U ノッチおよびプレス・ノッチ衝撃試験

室温および 300°C で予歪処理した鋼材から、U ノッチおよびプレス・ノッチ試験片を採取して衝撃試験を行なった結果は、Fig. 8 のとおりである。同一処理を行なった場合の V ノッチ衝撃試験の結果が、比較のためにあわせて記入してある。これらの曲線から、前と同様に各種の遷移温度値などを求めたものが、Table 4 である。なお U ノッチ衝撃試験の延性遷移温度 ($vTra$) を求めるには、厳密には低温側で多数の試験片を破断して、靱性値が遷移的に減少する温度を知らねばならないが⁽²⁾、いまは一応近似的に一定の低吸収エネルギー値 (15 ft-lbs) を用いて定めることにした。

Fig.8 Results of V-notch, U-notch and press notch Charpy impact tests (prestrain : tension).

Table 4 Comparison of V-notch, U-notch and press notch Charpy impact test results (prestrain : tension).

PREST. TEMP.	PRE-STRAIN (%)	SHAPE OF NOTCH	E MAX. (kg-m/cm ²)	ϕ MAX. (%)	T _{1/2} OF T _{1/2} (°C)	T _{1/2} (°C)	T _{1/2} (°C)	T _{1/2} (°C)
ROOM TEMP.	0	V-NOTCH	16.4	16.5	-27	-35	13	18
	0	U-NOTCH	20.2	22.2	-55	-60	—	7
	0	PRESS NOTCH	16.4	—	—	—	40	37
	10	V-NOTCH	12.4	8.5	15	15	32	33
	10	U-NOTCH	23.2	8.2	-22	-24	—	-8
	10	PRESS NOTCH	16.3	—	—	—	52	47
	70	V-NOTCH	4.1	4.0	30	6	35	(27)
	70	U-NOTCH	5.7	6.0	-22	-20	—	(-12)
	70	PRESS NOTCH	4.3	—	—	—	18	(15)
300°C	0	V-NOTCH	19.0	12.0	-23	-30	13	14
	10	U-NOTCH	12.6	8.0	80	77	100	95
	10	PRESS NOTCH	15.6	8.5	18	14	—	38
	10	PRESS NOTCH	15.6	—	—	—	93	84
	70	V-NOTCH	2.7	3.5	110	60	72	(70)
	70	U-NOTCH	4.0	4.5	30	25	—	(47)
	70	PRESS NOTCH	2.8	—	—	—	50	(80)

3.3 引張予歪の影響 (3) — U ノッチ衝撃試験の延性遷移温度

実施済みの V ノッチ衝撃試験と U ノッチ衝撃試験 (5 系列) の結果を検討すると, 両者の 15 ft-lbs 遷移温度の間にはかなり密接な関連性の存在が予想されたので, Table 3 中の V ノッチ衝撃試験の Tr_{15} から U ノッチ衝撃試験での 15 ft-lbs 遷移温度の値を予測し, かつ測定結果を順次参照しながら予測値を修正して, その温度を中心として 5 本の試験片により衝撃試験を行ない, Fig. 9 に示すように延性遷移温度付近の靱性値曲線を求めることができた。これから測定した U ノッチ衝撃試験の延性遷移温度 (Tr_d) を, 実施済みの 5 系列の結果とともに Table 5 に示す。

Fig.9 Ductility transition in U-Charpy test (prestrain: tension).

Fig.10 Result of V-Charpy impact test (3) (prestrain: compression).

Table 5 Tr_d (°C) determined by U-Charpy impact test.

E_n Temp. (°C)	0	2	5	10	22	35	50	70
20 (R.T.)	-55	-40	-25	-22	-7	15	8	-22
200	-55	-3	5	23	45	63	120	—
300	-57	-15	25	18	40	67	50	30
400	—	—	—	7	—	—	—	—
500	-63	-25	—	-28	—	—	—	—
600	—	—	—	-38	—	—	—	—

Table 6 Summary of V-Charpy impact test showing the effect of prestraining temperature (prestrain: compression).

PREST. TEMP.	PRE-STRAIN (%)	SHAPE OF NOTCH	E_{MAX} (kg-m/cm²)	ϕ_{MAX} (%)	Tr_{15} (°C)	Tr_{ϕ} (°C)	Tr_E (°C)	Tr_S (°C)
R. T.	25 (23~26)	V-NOTCH	13.2	10.6	17	7	42	46
100°C	—	—	13.4	11.0	35	20	67	64
200°C	—	—	9.6	8.8	16	60	90	93
300°C	—	—	9.1	8.5	120	98	144	133
400°C	—	—	11.8	10.5	66	54	90	105
500°C	—	—	13.6	11.5	30	14	82	82
600°C	—	—	15.4	12.3	0	-8	38	45

3.4 圧縮予歪の影響

室温ないし 600°C の温度で, 25% を標準とする圧縮予歪を与えた鋼材の V ノッチ衝撃試験の結果を, Fig. 10 に一括して示す。また Table 6 は, これらの曲線から引張予歪の場合と同様にして求めた遷移温度などの値である。

4 考 察

4-1 切欠靱性の判定

VノッチとUノッチおよびプレス・ノッチ衝撃試験の結果から、鋼材の切欠靱性の本質をどのようにして判定するかは、現在のところまだ最終的に結論されていないようである。すなわちアメリカにおける損傷船の調査報告にもとづいて、まずVノッチ衝撃試験の15 ft-lbs 遷移温度が重視され、これが鋼材の脆性破壊において決定的な重要性を持つものと最近まで考えられてきた。しかるに Robertson 試験や二重引張り試験などの伝播試験が提案されてからは、小型試験片の破面遷移温度の意義が再認識されて⁽⁴⁾、それに関連してプレス・ノッチ衝撃試験の長所が指摘されるに至った⁽³⁾。

さらにVノッチ衝撃試験で鋼材の延性遷移温度を求めるのに、高温側で有する切欠靱性値の相異を考慮せず、常に一定の15 ft-lbs エネルギーを用いるのは不合理であるから、延性遷移現象が遙かに明瞭にあらわれるUノッチ衝撃試験によつて、直接延性遷移点を測定するのがよいことが提唱された⁽²⁾。その結果、従来慣習的に採用されてきたVノッチ衝撃試験の Tr_{15} ・ Tr_s ・ Tr_E などの遷移温度は、権威を喪失しつつある観を呈している。したがって前述のようにして求めた衝撃試験の成績をいかに解釈するかは、慎重に検討されなければならない。特に本報告においては、多量の高温予歪の結果切欠靱性が異常に低下した特殊な状態の鋼材をも取扱っているから、こ

Fig. 11 Relation between both temperatures at maximum energy and at 100% shear in V-Charpy impact test.

Fig. 12 Relation between maximum energy maximum notch contraction in V-Charpy impact test.

の問題を十分に吟味することが必要である。

まずVノッチ衝撃試験において切欠靱性曲線の高温部の特性を定める基準量としては、曲線が最大吸収エネルギーに達する温度($T_{E(max.)}$)とその値($E_{max.}$)の両者が考えられる。

これらの量と他の基準量による靱性値との関連性を調べると、 $T_{E(max.)}$ は剪断破面率が100%となる温度(T_{s100})と、Fig. 11に示すごとく密接な直線関係のあることがわかる。また剪断破面率曲線は、全試験を通じてほぼ同一の傾斜を示したので、温度 T_{s100} の高低は Tr_s をもつて比較してよいであろう。

これに対して $E_{max.}$ は Table 3 などから知られるように、予歪処理温度の影響を受けない唯一の量であるから、剪断破面率とは無関係な独立した量であると考えるのがよい。

一方 $E_{max.}$ の値は、Fig. 12 からわかるごとく最大横収縮率($\phi_{max.}$)の値とかなり密接な関係がある。また Fig. 13 は、 $\phi_{max.}$ となる温度($T_{\phi(max.)}$)と $T_{E(max.)}$ の間にも関連性

Fig. 13 Relation between both temperatures at maximum energy and at maximum notch contraction in V-Charpy impact test.

う。もつとも予歪量が大きくてエネルギー曲線の傾斜が緩やかな若干の場合には、このようにして簡略に求めた $vTra$ が、果して真の延性遷移温度であるかは疑わしいが、Table 5 の $vTra$ の値は一応低温部の特性を近似的にあらわしているとしても、大きな誤りはあるまいと考えられる。

いまこの $vTra$ の値と、Vノッチ衝撃試験の Tr_{15} との関係を調べると、Fig. 15 から明らかなように、本実験の結果においては両者の間にかなり良好な直線関係の存在することがわかる。さらに Fig. 16 は、Vノッチ衝撃試験の Tr_{15} と Tr_{ϕ} の間にも関連性のあることを示すものである。

以上の考察によつて、本報告で取扱う範囲の切欠靱性の変化に対しては、高温側の特性はVノッチ衝撃試験の Tr_s と E_{max} の挙動を通じて、また低温部の特性は Tr_{15} の値によつて、ほぼ正確に把握しうることが期待されるに至つた。また横収縮率は、吸収エネルギーに準じた性質の基準量であることがわかつた。したがつて高温予歪の影響を検討する際は、主としてVノッチ衝撃試験の Tr_s と E_{max} および Tr_{15} を用いて、考察を進めることとする。なお Tr_s に関しては、プレス・ノッチ衝撃試験の結果にも注目する。

4.2 引張予歪の影響 (1) — V ノッチ衝撃試験

Vノッチ衝撃試験によつて求めた遷移温度と靱性値の中から、 E_{max} と Tr_s および Tr_{15} を選んで、これらが予歪温度と予歪量によりいかに影響されるかを示すと、Fig. 17 のごとくなる。なお図中には参考までに Tr_{ϕ}

のあることを示すものである。次に温度降下とともに切欠靱性が低下して行く過程は、上述したように高温部における靱性の飽和値と飽和温度を別に取り出しておくならば、1/2 エネルギー遷移温度 (Tr_E) をもつて代表させうると考えてよいであろう。この Tr_E と他の遷移温度との関係を調べると、Fig. 14 に示すごとく、 Tr_s と良い関連性があることがわかる。これに対して Tr_{15} との間には、密接な関連性は存在しない。

鋼材の切欠靱性の低温部の特性は、Uノッチ衝撃試験の延性遷移温度 ($vTra$) によつてあらわすのが妥当であろう。前述のようにUノッチ衝撃試験の延性遷移温度を厳密に求めるには、数多くの試験片を用いてエネルギー曲線の低温側を試験し、いわゆる遷移現象を呈しながら靱性が激減する温度を測定しなければならないとされている。しかし試験片の本数が少いときは、本報告で行なつたように Fig. 9 の要領で低エネルギー水準により $vTra$ を決定しても、同図および Fig. 8 中の曲線の形状などから考えて、その近似値としてはほぼ十分正確な値がえられたとしてよいであらう。

Fig. 14 Relation between both transition temperatures determined by energy and fracture appearance in V-Charpy impact test.

Fig. 15 Relation between ductility transition temperature in U-Charpy and 15ft-lbs transition temperature in V-Charpy impact tests.

Fig. 16 Relation between both transition temperatures determined by 15ft-lbs energy level and 2% contraction in V-Charpy impact test.

の挙動もあわせて示してある。

まず E_{max} は予歪量の増加とともに減少するが、低下の割合は漸次飽和して、約 50% 以上の予歪ではほぼ一定の小さい値となる。予歪温度の相違は余り影響を与えない。

これに対して Tr_s と Tr_{15} では、予歪量の増加に伴って明瞭な脆化（遷移温度の上昇）があらわれるとともに、予歪温度が違えば脆化の程度が著しく異なることが示されている。また一般に Tr_s の上昇よりも Tr_{15} の上昇の方が顕著である。脆化がもつともはなはだしくあらわれるのは、いわゆる青熱脆性温度と呼ばれる 200°C または 300°C での予歪処理である。 Tr_{15} の挙動から判断すると、この温度での予歪処理の悪影響は室温での処理に比べてきわめてはなはだしく、母材に比べて Tr_{15} の上昇は最悪の場合約 200°C 弱にもおよぶことは注目に値する。またこれよりも予歪温度が高くなるほど脆化は減少し、600°C での予歪は一般に室温予歪より有利となるに至り、多量の予歪を与えても母材に匹敵する切欠靱性を示すことすらある。

さきの E_{max} の挙動に準じて、予歪量が大きくなると Tr_{15} の上昇はほとんど認められなくなる。これに対して Tr_s は、約 50% 以上の予歪に対し逆に降下して、破面遷移温度から考えると切欠靱性はむしろ回復する。この奇異な現象がどのような原因に基づいて起るかは正確にはわからないが、いまだ多量の予歪を与えた鋼材の破面を観察すると、これは Fig. 18 の写真のように異常なものであることが知られる。すなわち写真において 10% 予歪のときは、延性破面 (fibrous または shear 型) と脆性破面 (cleavage 型) の境界は判然としているが、70% 予歪の場合を詳細に調べると、一見延性型と見られる破面の中に、微細な脆性破面が散在していることが発見できる。下段中央の写真の破面は注意して観察しないと延性破面と見誤るものであつたが、これを前方から照明して微細な脆性破面からの反射光を強調すると、その存在を明らかに認めうることを示している。また下段左方の脆性破面は低温で破断してえられたが、脆性破面と延性破面の境界はやはり判然としない傾向が認められる。本実験で剪断破面率を測定するときは、上述のごとき疑似延性破面は純粋な延性破面として分類したので、そのため多量の予歪処理が見掛け上 Tr_s の下降を誇張する結果となつたものであろう。

4.3 引張予歪の影響 (2) — U ノッチおよびプレス・ノッチ衝撃試験

U ノッチおよびプレス・ノッチ衝撃試験の結果について、Fig. 17 の要領で切欠靱性の変化を図示し、V ノッチ衝撃試験の結果と比較したものが Fig. 19 である。実験した系列が少いのにわかには断定することはできないが、U およびプレス・ノッチ衝撃試験が、V ノッチ衝撃試験と特に異なつた現象を示すことは無いようである。

Fig.17 Summary of V-Charpy impact test showing the effects of amount and temperature of prestraining (prestrain : tension).

Fig.18 Fracture surfaces of V-Charpy specimen.

Fig. 19 Summary of V-notch, U-notch and press notch Charpy impact tests showing the effect of prestraining temperature (prestrain : tension).

Fig. 20 Summary of V-Charpy impact test showing the effect of prestraining temperature (prestrain : compression).

ただしUノッチ衝撃試験の $E_{max.}$ に対しては、300°C 10% 予歪の悪影響が顕著であつた。なお本報告で取扱つた範囲では、Uノッチ衝撃試験の延性遷移温度 (Tr_d) がVノッチ衝撃試験の Tr_{15} と関連性のあつたことは、すでに述べたごとくである。

4.4 圧縮予歪の影響

各種の高温で圧縮予歪 (25%) を与えた鋼材の切欠靱性の変化は Fig. 20 に示す通りで、このときは 300°C での予歪処理がもつとも悪影響を与えた。Fig. 20 の結果を Fig. 17 の引張予歪処理の結果と比較すると、一般に 25% の圧縮予歪処理は、22% ないし 35% の引張予歪処理に相当する効果を、鋼材の切欠靱性に与えるとしてよいようである。300°C での悪影響が顕著であつたことを考慮しても、全体として圧縮予歪処理は同量の引張予

歪処理よりも若干脆化が大きい程度と推定され、鋼材の切欠靱性に対し両者が本質的に異なつた作用をおよぼすとは考えられない。

4.5 高温予歪処理による脆化の機構

以上述べてきたように、一般に 500°C 以下の高温予歪処理は、室温での予歪処理よりも鋼の切欠靱性を低下させ、特に 200°C または 300°C の処理によつて、はなはだしい脆化の現象が見られた。

室温予歪にくらべて高温予歪が鋼材をはなはだしく脆化させる原因として第1に予想されるのは、高温では結晶学的な塑性変形の機構およびその影響などが室温の場合と異なつていて、そのために脆化の現象が顕著にあらわれる可能性である。

第2に考えられるのは歪時効の影響である。よく知られているように、あらかじめ冷間加工した鋼を約 250°C 付近の温度に約 1hr. 程度以上保持すると、著しい歪時効の現象を示して切欠靱性は低下するものである⁽¹⁰⁾。しかし本報告の実験においては、引張予歪を与えて終うに要した時間は 4min. 以内であつたから、歪時効に寄与した実効時間はさらに少いであろう。また Fig.2 から推定されるように、300°C での予歪処理のときは、試験片の温度は予歪を与えてから約 2min. 後には約 150°C まで降下し、時効現象が活発な温度範囲をほぼ脱出する。200°C の予歪処理では、冷却に要する時間はさらに短い。そのように考えると歪時効を考慮すべき温度に試験片が置かれた時間は、多くとも約 5min. 位であろうと推察される。かかる短時間で歪時効現象がかなりの程度進行するか否かについては、現在のところまだ研究が全く行なわれていないが、歪時効に関する従来の常識的な概念をもつてすれば、かなり否定的なように思われる。しかし 200°C ないし 300°C での予歪処理による切欠靱性の損耗は余りにも激烈であるから、脆化の機構をさらに検討して両因子の果す役割を明らかにすることは、重要な意義を持つてであろう。このように短時間の歪時効に関する資料が皆無なのは遺憾であるが、しかし本報告で行なつた電気的方法によれば、試験片を試験機に取付けたまま加熱して直ちに歪を与えうるので、容易にこの現象を検討することができる。

筆者らは詳細を付録に示すように、室温および 250°C で予歪を与えた後に、種々な時間(0min. ないし 24hr.) 保持した鋼材の機械的性質と切欠靱性を比較検討して、以下に記す新知見を明らかにすることができた。

(1) 室温で予歪を与え 250°C に加熱保持すると、歪時効は予期に反してきわめて急速に進行し、ごく短時間(数 min. 以内の程度)の中に現象はおおむね完了する。

(2) 250°C に保ちながら加えられた塑性変形(すなわち高温予歪)は、やはりきわめて短時間の中に鋼を脆化させる。

(3) (2) の高温予歪による脆化は(1)の歪時効による脆化よりもはなはだしく、室温予歪のみによる脆化との差をとつて比較すると、一般に前者は後者の2倍以上にも達した。

(4) 高温予歪と歪時効による脆化度の差(すなわち(2)と(1)の差)は、さらに 24hr. の間 250°C に試験片を保持しても全く変化しない。したがつて時効現象が活発な約 250°C 付近の温度に、24hr. 程度の長時間保持しても変化しない脆化を非時効性のものと定義するならば、高温予歪と室温予歪による切欠靱性の低下度の差は、その過半が高温における特殊な塑性変形の機構またはその影響などに基つくと推測される非時効性のもので、残部が歪時効現象に基づくものであると考えられる。

本報告の供試鋼の化学成分は、Table 1 に示したような標準的なキルド軟鋼であつて、O₂ や N₂ などのガス成分も少く、時効性が比較的少い鋼種であつたにもかかわらず、200°C ないし 300°C の予歪処理による切欠靱性の低下はすこぶる顕著であつた。この事実は溶接部の低荷重破壊の機構を解釈する際に、重大な意義を有するものであろう。溶接部の低荷重破壊を促進する因子としては、応力論的な要因と冶金学的な要因とがあるが、従来は前者が主として注目を集めていたようで、特に溶接残留応力場の持つ歪エネルギーが、脆性破壊現象において trigger の役目を果たすることが強調された^{(6),(6)}。これに対して冶金学的な説明の1つとして、圧縮予歪による残留延性の消耗を説く一部の論者もあるが⁽⁷⁾、その議論は余りにも素朴に過ぎることはさきに筆者らが指摘し、かつその誤りであることを証明した⁽¹⁾。またすでに Orowan は、溶接部の低荷重破壊に歪時効が関与する可能性を説いた⁽⁸⁾が、その論旨は実験を伴わない定性的なものであつて、歪時効の実現にはかなりの時間が必要であるとする常識的な概念が打破されないかぎりでは、非現実的な議論の域を脱しえなかつた。しかし本報告により始めて 200°C ないし 300°C における高温予歪の致命的な悪影響が実証されるにおよんで、溶接作業に関連して鋼材の切欠靱性がそのために著しく損われる可能性が確実視されるに至つた。したがつて溶接部の低荷重破壊の

検討に当つては、応力論的な要因とならんでこの種の冶金学的な要因の重要性をも、十分認識することが必要になつたと考えざるをえない。

4.6 残留延性に与える影響との比較

さきに報告した高温予歪が残留延性に与える影響の研究⁽¹⁾によれば、一般に高温での処理は室温予歪より残留延性を一層減少させるが、その差は本報告で認められた両処理後の切欠靱性の相違に比較すれば、問題とするに足りない程度であつた。また残留延性をもつとも減少するのは 200℃ と 500℃ での予歪処理であつたが、切欠靱性試験においては室温予歪に比べて 500℃ 処理の悪影響は余り認められなかつた。さらに約 60% までの圧縮予歪は一般に残留延性を減少させず、引張予歪に比べて明らかに有利であつたが、切欠靱性試験においては引張予歪と圧縮予歪の間にほとんど差が認められず、むしろ圧縮予歪の方が若干不利な傾向があつた。

このように高温予歪処理が残留延性と切欠靱性に与える影響が異なる原因は現在のところまだ不明であるが、これは恐らく高温予歪処理が延性破壊応力曲線と脆性破壊応力曲線に与える影響が異なるためであろう。筆者らは別報⁽⁹⁾に記したごとく、円周切欠試験片の引張破壊特性を明らかにして、鋼材の破壊応力曲線を探索するための準備を整えたのであるが、その成果に基づいて、さらに上述の見解を実証すべく研究を続行する予定である。

4.7 鋼の熱間加工について

船殻部材の熱間工作に関連して予想される危険性については前報においても触れたが、本報告の結果によれば、高温予歪が鋼材の切欠靱性におよぼす悪影響はさらに著しく、かつ 200℃ または 300℃ での予歪が特に好ましくないことが判明した。

この危険な温度はいわゆる青熱脆性温度であつて、従来からその範囲では熱間加工を行なうべきではないとされてきた。しかし最近採用され始めた新しい熱間工作法や歪取り作業においては、施工に万全の注意を払わないと、この温度でかなりな塑性歪を鋼材に与える危険性が皆無ではないと思われる。本報告で明らかにされた切欠靱性低下の現象と関連して、その適正な使用範囲を慎重に考慮することが必要であろう。

5 総 括

キルド軟鋼に室温ないし 600℃ の範囲で各種の量の予歪を与えて、V ノッチ、U ノッチおよびプレス・ノッチ衝撃試験を行なつた。これら 3 種の衝撃試験によつて求められた多くの切欠靱性値について、それらの特性と関連性を検討した結果、高温予歪処理を受けた鋼材の切欠靱性は、基準値として V ノッチ衝撃試験の E_{max} と Tr_s および Tr_{15} の 3 者を選ぶことにより、かなり正確に把握しうることを知つた。

これらの基準値のいずれによつて判定しても、引張予歪量が増すと切欠靱性は低下するが、低下の度合は漸次飽和して、約 50% 以上の予歪では一般にほぼ一定の低い値を示すに至る。また予歪温度の差の影響が顕著にあらわれるのは Tr_{15} と Tr_s に対してであるが、もつとも有害なのは 200℃ または 300℃ における処理で、最悪の場合 Tr_{15} の上昇は母材に較べて約 200℃ 弱にもおよんだ。これより高温の予歪処理では切欠靱性の低下は少くなり、600℃ の処理の際は靱性が低下しないことすらある。なお 50% 以上の多量の引張予歪を与えると、 Tr_s のみは逆に降下して靱性回復の傾向を示すが、これは主として延性破面の異常に基づく見掛けの現象であろうと考えられる。

また圧縮予歪処理は引張予歪処理とほぼ同様な影響を与えたが、既報の残留延性に対する場合とは逆に、圧縮予歪の方が若干不利な傾向のようであつた。200℃ または 300℃ での予歪処理が、鋼の切欠靱性をいじめるしく低下させる機構を明らかにするため行なつた追加実験の結果(附録参照)によれば、高温予歪と室温予歪による靱性低下度の差は、その大半が非時効性のもので、残余が歪時効と見なされる部分であり、非時効性の靱性低下は、歪時効によるそれよりも大きかつた。また両現象はきわめて短時間(数 min. 内)の中に進行しほぼ完了してしまうことが判明した。本報告によつて与えられたこれらの新しい知見は、溶接部の低荷重破壊現象を探索するに当つて、重要な意義を有するものであろう。

謝 辞

研究の実施と検討に際して、東京大学・木原博教授は絶えず有効な助言を与えられた。また造船協会電気溶接研究委員会(第6分科)の委員各位に、研究計画と結果の討議を煩わした。なお実験は文部省科学試験研究補助金の交付を受けて行なわれた。これらの御援助に対して厚く感謝の意を表わすものである。

付録 高温予歪処理と歪時効の関係

200°C ないし 300°C における高温予歪処理が、鋼の靱性を著しく低下させる機構を検討するために、以下に

Table 1 A Steel tested.

Chemical analysis					Total O ₂	Total N ₂	AlN
C	Si	Mn	P	S			
0.14	0.17	0.63	0.014	0.029	0.0079	0.007	0.0015

Mechanical properties (JIS No.4 specimen)			
Y. P. (kg/mm ²)	T. S. (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
23.1	42.0	39.7	64.0

記すとき追加実験を行なった。

使用した鋼材は Table 1 A に示す造船用キルド軟鋼で、その化学成分はさきに使用した鋼材 (Table 1) に酷似し、また機械的性質も類似している。なおオーステナイト結晶粒度は 2、フェライト結晶粒度は 5.5 であった。

靱性の判定は、既報の残留延性試験⁽¹⁾と本報告の V ノッチ衝撃試験などによつて行なうこととした。

Fig.1 A Mechanical properties and hardness affected by heating time at 250°C after prestraining by 10% in tension.

Fig. 2 A Mechanical properties and hardness affected by heating time at 500°C after prestraining by 10% in tension.

残留延性試験においては、高温引張予歪を与える温度を 250°C と 500°C の 2 種とし、予歪量を 10% とした。既報の要領で予歪処理した後、予歪処理したその温度にそれぞれ 2・5・10・40・60 min. 保持し、また 250°C 予歪のときは引続き 24 hr. 保持をも行なつてから空冷した。10 min. 以内の保持は、電気的な加熱チャックに試験片を加えたまま電流を微小調整して行な

Fig. 3 A Effect of additional heat treatment on strength and ductility of steel prestrained at 250°C or strain aged.

い、また 20 min. 以上の保持はその後に試験片を電気炉中に入れて行なつた。処理後の試験片を室温まで空冷させてから約 -5°C の低温に冷蔵しておき、約 1 日後に残留延性試験を行なつた。諸計測の方法は既報の通りである。その際上降伏点と引張強さ (nominal tensile stress) および硬度の測定をもあわせて行なつた。

また室温 (約 20°C) で 10% の冷間引張予歪を与えてから、試験片をチャックに取付けて通電して 250°C に加熱し、かつこの温度での保持時間を同様に変えた処理をも行なつて、高温予歪の結果と比較した。

この系列はいわゆる歪時効に相当するもので、標準の時効時間が約 1 hr. であるのに対して、短時間保持の効果を調べたものである。また 250°C に引続き 24 hr. 保持したものをも加えて試験した。なお以下に示す引張試験の実験値はすべて 2 ないし 4 本に対する平均である。

試験の結果は、250°C 保持の場合が Fig. 1 A、500°C 保持のときは Fig. 2 A のごとくである。

引張試験において歪時効現象は、降伏点の上昇に対してもつとも敏感に現われ、かつ残留延性の減少と引張強さの増加をも伴うことが知られているので⁽¹⁰⁾これらの挙動を Fig. 1 A について注目すると、250°C における予歪処理の影響は歪時効の結果生ずる硬化と脆化よりも著しく、室温予歪による影響との差をとって比較すると、両者の差は歪時効が単独で与える影響に匹敵することがわかる。また時効現象が活発な 250°C に 24 hr. 保持しても、両者の与える効果とその差はほぼ不変であることから考えて、両処理の影響の差は非時効性のものであらうと推定される。

Fig. 4 A Result of V-Charpy impact test showing the effect of heating time at 250°C after prestraining by 10% in tension at 250°C.

Fig. 5 A Result of V-Charpy impact test showing the effect of heating time at 250°C after prestraining by 10% in tension at room temperature.

なお歪時効処理における標準の保持時間 60 min. と短時間保持の影響の間には、ほとんど相違が認められなかった。混乱を避けるため Fig. 1 A 中には記入していないが、室温予歪を与えてから電氣的に 250°C に加熱し保持時間 0 min. で空冷した場合も、保持時間 2 min. とほぼ変らない成績を示した。250°C まで加熱するには約 3 min. を要するのみであり、かつ歪時効に寄与する実効時間はそれよりもさらに短いであろうから、これらの結果から判断して、歪時効の現象はきわめて短時間（多くとも数 min. 以内）の中に進行しかつほぼ完了してしまふものであることがわかる。

同時に Fig. 2 A から明らかなように、500°C 予歪の効果もその後の保持時間に概して影響されなかったが、降伏点のみは 保持時間が長くなると低下する傾向を示した。

また 250°C および 500°C で処理した鋼材のビッカース硬度を測定した結果は、Fig. 2 A 中に示すごとくであった。すなわち 250°C 予歪処理による硬化は歪時効による硬化よりも著しく、硬度の上昇は平均約 2 倍強に達し、またこの温度での保持時間の影響をもほとんど受けないようで、機械的性質に対してえられたさきの結果を裏書きしている。500°C の加熱によつては、やや緩慢な軟化の現象が認められたようである。

また Fig. 3 A は、250°C で 10% の予歪処理または室温予歪後 250°C で 5 min. 歪時効処理を行なつた鋼材について、650°C・1 hr. の低温焼鈍と 880°C 焼準の影響を示すものであるが、両予歪処理による影響はいずれの場合にもほとんど消失しているようである。一般に軟鋼の時効による硬化はもちろんのこと冷間加工による硬化も、約 650°C 以上の焼鈍ではほぼ取除かれることが知られている⁽¹⁰⁾が、Fig. 3 A の結果はこれと矛盾しない。

つぎに V ノッチ衝撃試験を行なう際の、引張予歪を与える要領と保持時間は、残留延性試験の場合に準じたも

のとした。ただし加熱温度は 250°C の 1 種とし、また保持時間は 60 min. に止めた。衝撃試験の結果は Fig. 4 A と Fig. 5 A のごとくである。Fig. 4 A は 250°C で 10% 予歪を与えてから、引続いて 250°C に種々な時間保持した鋼材の切欠靱性を示す。また Fig. 5 A は室温で予歪を与えてから、250°C に加熱保持したものである。これらの結果からさきの要領で切欠靱性値の変化を求めて図示すると、Fig. 6 A がえられる。 E_{max} において室温予歪後 2min. 保持のものが例外的な値であつたのを除いて、これらの切欠靱性値の挙動からえられる結論も、残留処理試験の結論と同様であり、かつ室温予歪による脆化との差をとつて比較すると Tr_{15} と Tr_s から判定した方が、さきの残留延性試験の結果よりも高温予歪による脆化は一層はなはだしく、歪時効による脆化の 2 倍以上に達することが明らかであつた。なお Fig. 6 A 中には記入していないが、室温予歪後 250°C に 0min. 加熱したものも、2min. 保持とはほぼ等しい遷移温度値を示し、かつ E_{max} は 11.2 kg-m/cm² であつた。

参 考 文 献

- (1) 寺沢・大谷・吉田・寺井：造船協会論文集，108，p. 249.
- (2) H. Kihara, T. Yoshida & H. Ōba：IIW X-217-59.
- (3) 越賀：造船協会論文集，104 号，p. 267.
- (4) J. Hodgson & G. Boyd：INA., Paper No. 1, Mar. 25, 1958.
- (5) A. Wells：INA., Paper No. 6, Mar. 22, 1956.
- (6) H. Kihara & K. Masubuchi：Weld. J., 4, 1959, p. 159-s.
- (7) C. Mylonas：Weld. J., 10, 1959, p. 414-s.
- (8) B. Averbach, et al.,：Fracture (MIT & Wiley), 1959, p. 147.
- (9) 寺沢・大谷・吉田・寺井：関西造船協会誌 98 号，1960，p. 17.
- (10) 例えば C. Edwards：The Structure and Properties of Mild Steel (J. G. Miller), 1952.

Fig. 6 A Summary of V-Charpy impact test showing the effect of heating time at 250°C after prestraining by 10% in tension at room temperature or 250°C.