原子炉用高張力鋼溶接継手の高温引張および クリープ・ラプチャ試験*

鈴木春義** 稲垣道夫** 岡根 功** 馬田豊昭***

A Study on High Temperature Tensile and Creep Rupture Tests of Welded Joints of High Strength Steels for Nuclear Reactors *

By Haruyoshi Suzuki,** Michio Inagaki,** Isao Okane,** and Toyoaki Bada***

Abstract

High temperature tensile and creep rupture properties of six low alloy high strength steels were investigated for base metals and welded joints which were made with covered electrodes. Test steels were all 30 mm thick, four HT 60 (three normalized and one quenched & tempered) and two HT 70 quenched & tempered steels which were produced experimentally for nuclear pressure vessels.

The results are that:

- (1) The high temperature tensile and rupture strengths of welded joints were generally inferior to those of base metals.
- (2) The tensile strength of both base metals and welded joints began to decrease at 300°C for quenched & tempered HT 60 and HT 70 steels, and at 350°C for normalized HT 60 steels.
- (3) The rupture of tensile specimens of welded joints was generally located in base metal at lower temperatures, and in weld metal at higher temperatures.
- (4) Generally, higher creep rupture strengths were observed for steels with higher tensile strengths at high temperatures.
- (5) As far as the present test steels are concerned, normalized steels seem to have better high temperature strength than quenched & tempered steels.

1. 緒 言

従来、米国などの原子炉用压力容器には切欠じん性の良好な軟鋼またはボイラ用鋼などが使用されているが、原子炉用高張力鋼としてはまだほとんど開発されていない。日本溶接協会原子力研究委員会では昭和35年度原子力局補助金研究として「原子炉用高張力鋼の溶接に関する研究」を行なった。これはこの方面の総合的な開発研究としては、わが国始めてのころみである。本研究はこの研究に関連して行なわれたものである。

原子炉用高張力鋼の性能としては、とくに切欠じん性、高温性能および溶接性の三者を同時に満足するようなものが望まれる。また原子炉特有の問題として熱中性

子吸収断面積が小さく放射線損傷の少いことが要求される。これらの要求を全部満足するような高張力鋼を開発することが理想であるが、現実にはかなり困難である。本研究においては原子炉用として試作された板厚30 mmの引張強さ 60 kg/mm² 以上を有する高張力鋼（以下 HT 60 鋼と称する。）4 種および引張強さ 70 kg/mm² 以上を有する高張力鋼（以下 HT 70 鋼と称する）2 種計 6 鋼種について母材および溶接継手の高温引張試験とクリープ・ラプチャ試験を行ない種々比較検討した結果を報告する。

2. 供 試 鋼 材

供試鋼材は原子炉用高張力鋼として試作された板厚30 mm の HT 60 鋼 4 種（焼準鋼 3 種 6NA, 6NB, 6NC および調質鋼 1 種 6Q）および HT 70 鋼 2 種（調質鋼 7QA, 7QB）合計 6 種で、その製造履歴、化学成分ならびにオーステナイト結晶粒度は Table 1 に示すとおりで

* 原稿受付 昭和38年4月8日（昭和36年度溶接学会 秋季学術講演会において発表）

** 正員 金属材料技術研究所 Member, National Research Institute for Metals Member,

*** 正員 富士製鉄中央研究所 Central Research Laboratory Fuj Iron and Steel Co., Ltd.

Table 1 Chemical analysis (%) of used steels

Used steel	Plate thick- ness	Alloying element	Heat treatment	Element (%) (Upper value ; ladle analysis, under value ; check analysis)												Ceq. (%)	A.G.S. No.
				C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	other	sol Al		
6NA N	30mm	Mn-Cr- Mo-V	900°C CN 450°C CT	.13 .12	.45 .45	1.14 1.17	.016 .013	.008 .006	— —	— —	.30 .32	.23 .25	.10 .14	— —	.030 .026	.47 .46	4
6ZB N	"	Mn-Mo- Ni	880°C CN AC	.15 .15	.28 .28	1.25 1.34	.015 .011	.007 .006	.11 .11	1.19 1.15	.40 .02	.39 .31	— —	— —	.51 .025	.49	6-7
6NC N	"	Mn-Mo- V	900°C AC 650°C TAC	.14 .15	.36 .35	1.24 1.28	.028 .029	.023 .020	— .10	.44 .47	— .08	.22 .21	.12 .10	— —	.44 .013	.45	7
6Q Q&T	"	2H type -Mo	950°C WQ 680°C TAC	.15 .15	.32 .34	.96 .92	.014 .015	.013 .014	.22 .27	.24 .29	.11 .10	.48 .51	— Tr.	— Ti Tr	.47 .020	.48	5-9
7QA Q&T	"	Mn-Cr- Mo-V	930°C WQ 670°C CT	.12 .11	.40 .38	1.09 1.06	.017 .022	.012 .012	— —	— —	.43 .44	.48 .48	.10 .12	— —	.037 .031	.53 .52	6
7QB Q&T	"	Mn-Cr- Mo-B	880°C WQ 670-680 °C FC	.14 .15	.30 .31	1.04 1.11	.015 .015	.009 .010	.25 .24	.44 .44	.59 .56	.46 .46	.06 .06	B 002 B 002	.02 .02	.57 .59	5-7

Remarks.....N ; Normalizing. T ; Tempering. WQ ; Water Quench. AC ; Air Cooling. FC ; Forced Cooling.

Ceq = $C + 1/6 \text{ Mn} + 1/24 \text{ Si} + 1/40 \text{ Ni} + 1/5 \text{ Cr} + 1/4 \text{ Mo} + 1/40 \text{ V}$

A.G.S. Austenite Grain Size

ある。溶解炉は 6NC 鋼のみ 60 t 平炉で、他は 10~20 t エル炉または電気炉である。6NA および 7QA 鋼はアルミキルド鋼、6Q 鋼は Mn-Si キルド鋼、7QB 鋼は酸素吹精後白滓法により脱酸を行なった鋼である。熱処理としては、6NB 鋼のみは単純な焼ならしが行なわれ、6NA および 6NC 鋼は焼ならし後空冷またはある程度強

制冷却が行なわれ、さらに低温で焼もどされた。6Q, 7QA および 7QB 鋼は水焼入れ後もどされたいわゆる調質鋼である。いずれの鋼種も Mn および Mo が入っており、6Q 鋼は他の合金元素をほとんど含まず、6NB 鋼はこれに Ni を添加、6NC 鋼は V を添加、6NA および 7QA 鋼は Cr と V を添加、7QB 鋼は Cr および B を添

Photo. 1 Microstructures of used steels as received ($\times 400$)

Table 2 Chemical analysis (%) and mechanical properties of weld metals for used steels

Used steels	Element (%) (Check analysis)							Yield point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation GL 50 (%) mm	Reduction of area (%)
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Mo				
6NA	.09	.84	.49	.018	.019	1.02	.24	55.6	63.7	30.3	
6NB	.08	1.06	.46	.021	.012	.72	.23	61.7	68.6	25.2	66.0
6NC	.07	1.10	.62	.011	.012	.62	.21	53.0	64.7	29.4	72.3
6 Q	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
7QA	.07	.92	.41	.018	.016	2.89	.31	61.7	73.2	25.0	55.7
7QB	.07	1.00	.65	.008	.010	2.63	.26	62.2	75.1	26.2	66.7

加している。リード分析値とチェック分析値はかなりよく一致しており、炭素当量は HT 60 鋼が 0.43~0.51, HT 70 鋼は 0.52~0.59 の範囲にある。これら各鋼種受入れ状態の顕微鏡組織は Photo 1 のとおりである。6NA, 6NB および 6NC 鋼はだいたいフェライトとパーライトからなる組織で、6NA 鋼はパーライトが一様に分散し、6NB 鋼はやや過熱組織を呈し、6NC 鋼はパーライトが帯状に並んでいる。6Q, 7QA および 7QB 鋼は調質鋼であるので焼もどしマルテン組織を呈している。

以上の各鋼種溶接継手試験片を製作するのに使用した溶接炉は Mn-Ni-Mo 系の被覆アーク溶接棒で溶接金属

の化学成分および機械的性質は Table 2 に示したとおりである。なお機械的性質は溶接したままのものである。

3. 試験片

母材試験片については板厚 30 mm の供試鋼材より高温引張試験は JIS 4 号丸棒試験片 (L/D=50 mm/10 mm =5) を、クリープ・ラプチャ試験は Fig. 1 (c) に示す試験片 (L/D=30 mm/6 mm =5) を製作しそれぞれ試験に供した。溶接継手試験片については同様に板厚 30 mm の供試鋼材に Fig. 2 の条件で突合せ溶接を行ない、Fig. 3 に示す位置から Fig. 1 (a) および (b) に示

(a) Specimen for Tensile Test at High Temperature.

(b) Specimen of Welded Joint for Creep Rupture Test.

(c) Specimen of Base Metal for Creep Rupture Test.

Fig. 1 Size of specimens for tensile test at high temperature and creep rupture test

Used Steel	Type of Bevel	Diameter of Electrode	Welding Position	Preheating Temp.(°C)	Welding Current(A)
6 N A		4~5 ϕ mm	Flat Welding	200	160 ~ 200
6 N B		4~5 ϕ mm	Flat Welding	200	160 ~ 200
6 N C		4 ϕ mm	Flat Welding	No	140 ~ 175
6 Q		4~5 ϕ mm	Flat Welding	100	180 ~ 240
7 Q A		4 ϕ mm	Flat Welding	100	140 ~ 175
7 Q B		4~5 ϕ mm	Flat Welding	200	180 ~ 240

Fig. 2 Welding conditions for welded joints of used steels

Photo. 2 Photographs of region fractured for tensile test at high temperature of welded joints

Fig. 3 Position of the specimen in welded joint

したような溶接継手試験片（高温引張試験片； $L/D=60\text{ mm}/10\text{ mm}=6$ ，クリープ・ラプチャ試験片； $L/D=70\text{ mm}/10\text{ mm}=7$ ）を製作し，それぞれの試験に供した。なお母材試験片と溶接継手試験片の寸法が異なっているのは試験機の容量および溶接継手における溶接金属と熱影響部の範囲を考慮したためである。

4. 実験方法

供試鋼材全 6 種について高温引張およびクリープ・ラプチャ試験を下記の条件で実施した。

4.1 高温引張試験方法

高温引張試験においては試験温度を室温（ 18°C ），250，

350，450，550，650 $^\circ\text{C}$ の 6 温度とし，それぞれの温度で引張試験を行ない，降伏点（0.2%の永久歪を生ぜしめる応力），引張強さ，伸びおよび絞り求めた。また溶接継手試験片については破断箇所も観察した。溶接継手試験片は各鋼種とも溶接のままの状態では試験に供した。なお母材高温引張試験は供試鋼材製造会社で実施したものである。

4.2 クリープ・ラプチャ試験方法

クリープ・ラプチャ試験においては母材および溶接継手試験片とも 400 $^\circ\text{C}$ の温度で試験を行ない，応力と破断時間の関係を求めた。なお溶接継手試験片は各鋼種とも溶接のままの状態では試験に供した。

5. 実験結果および考察

5.1 高温引張試験

試験に供した全 6 鋼種の溶接継手高温引張試験結果を各鋼種別に示したのが Fig. 4 で，その切断状況を示し

Fig. 4 Mechanical properties of used steels at high temperature tensile test

たのが Photo 2 である。これらの結果によると試験温度が 350°C までの引張試験結果は室温の場合にくらべてあまり変わらないようである。また一般に試験温度が高くなるにしたがい、切断箇所は母材部より溶接金属部へ移行していることも Photo 2 より明らかである。各鋼種の溶接金属部で切断する温度は Table 3 のとおりで

Table 3 Temperature of rupture in weld metal for used steels

Used steel	6NA	6NB	6NC	6Q	7QA	7QB
Temperature	<25°C	>55°C	—	>650°C	>650°C	>650°C

ある。なお 6NC 鋼はこの試験温度範囲 (18~650°C) では溶接金属部切断はみられなかった。

Fig. 5 は各鋼種について母材と溶接継手の高温引張強さを比較したものである。以下各鋼種別に母材と溶接継手の高温引張強さを比較検討する。

6NA 鋼は母材の高温引張試験が鋼材不足のためできなかったので溶接継手と比較はできない。しかし Table 3 に示したようにきわめて低い試験温度 (250°C) で溶接金属部切断を起している。このことから 6NA 鋼溶接継手に使用した被覆アーク溶接棒は母材に対して溶接金属

が高温において強度不足であることが推察される。

Fig. 5 (a) は 6NB 鋼の場合である。この図によれば両者の傾向はよく似ておりあまり差はみられない。母材および溶接継手とも 350°C 付近は室温の場合に比べて引張強さが増加している。これは青熱ぜい性によるものと考えられる。この点を境にして母材と溶接継手の引張強さの大小が逆になる。すなわち 350°C 以下の温度では溶接継手は母材より大きい。350°C 以上の高温になれば逆に溶接継手の引張強さは低下し、その低下の割合は高温になるほど大きい。Table 3 によればこの 6NB 鋼の溶接金属部で切断する温度は 550°C 以上である。以上のことから溶接金属は母材に比して高温になるにしたがい強さの低下の割合が大きいことが推察される。

Fig. 5 (b) は 6NC 鋼の場合である。傾向的に云えば両者はほぼ同様である。温度に対する両者の引張強さを比較すれば溶接継手は室温の場合を除き他はすべて母材の場合より引張強さは大きい。Table 3 によればこの 6NC 鋼は本試験温度範囲 (18~650°C) では溶接金属部切断は生じなかった。これらのことから母材の高温引張強さが溶接金属に比べて小さいことが推察できる。

Fig. 5 (c), (d) および (e) はそれぞれ 6Q, 7QA および 7QB 鋼の場合である。これらの図によればこの 3

Remarks;

—○— Tensile Strength at Base Metal
- - -●- - Tensile Strength of Welded Joint

Fig. 5 Comparison of tensile strength at high temperature for base metals and welded joints of used steels

鋼種とも母材と溶接継手の引張強さの温度に対する傾向はほぼ同様であり、いずれも溶接継手の引張強さは母材のそれよりも小さい。これら 3 鋼種とも焼入れ焼もどしのいわゆる調質鋼である。これが急熱急冷の溶接熱サイクルを受けその調質効果が失われ、このために前述のように溶接継手の引張強さは母材のそれに比べて小さくなるものと考えられる。なお Table 3 によればこれら 3 鋼種はいずれも 650°C で溶接金属部切断を生じている。

引張試験の結果伸びにあまり大きな変化はみられず、また各鋼種についての比較が困難なので、結果を Fig. 6

Fig. 6 Decreasing ratio of tensile strength of welded joints at high temperature (σ_T) to the one at room temperature (σ_0): $(\sigma_0 - \sigma_T) / \sigma_0 \times 100\%$

のように各鋼種の溶接継手引張強さの温度に対する低下率で棒グラフにより整理した。引張強さの低下率として

は高温における引張強さ (σ_T) の室温における引張強さ (σ_0) に対する減少率で表わした。すなわち、

$$\text{低下率} = (\sigma_0 - \sigma_T) / \sigma_0 \times 100\%$$

を縦軸にとった。図中斜線部分は溶接金属部における切断を示している。

この図は各供試鋼材溶接継手について、その高温における引張強さの室温におけるそれに対する低下率を各試験温度が比較できるようになっている。たとえば試験温度 350°C の場合については 6NA 鋼は 4.77% の減少、6NB 鋼は 6.42% の増加、6NC 鋼は 2.62% の減少、6Q 鋼は 2.40% の減少、7QA 鋼は 1.54% の減少、7QB 鋼は 4.62% の減少で 6NA 鋼がもっとも引張強さの低下が大きくもっとも悪いことを示している。以下 7QB, 6NC, 6Q, 7QA の順に低下率が小さくなっていることがわかる。また 6NB 鋼は逆に増加しているが、これは前述の青熱ぜい性の影響と考えられる。同様に試験温度 450°C の場合については 6NA, 6NB, 6NC, 6Q, 7QA, 7QB 鋼の低下率はそれぞれ 20.8, 15.6, 17.4, 17.9, 17.8, 27.9 で 7QB 鋼がもっとも大きく低下している。以下 6NA, 6Q, 7QA, 6NC, 6NB の順に強さの低下率は小さい。またこの図より各鋼種とも 350°C まではその強さの低下率はわずか 5% 以下であるが 450°C になると 15% 以上と急に増加しているのでこれら供試鋼材は 450°C 付近の温度で軟化が始まることが想像される。Fig. 6 より明らかに溶接金属部における切断は 6NA 鋼を除いて、この軟化温度すなわち 450°C 付近以上で生じている。また Table 3 に示したように焼準鋼 6NB 鋼の溶接金属部における切断は 550°C 以上があるのに対し、調質

Fig. 7 Comparison of mechanical properties at 450°C and room temperature for used steels

鋼 6Q, 7QA, 7QB 鋼はいずれも 650°C 以上の高い温度を示している。

一般に前述のように供試鋼材は 450°C 付近で軟化が始まり、また実際の構造物においても鋼材の使用温度は 400°C 以下と考えられるので各鋼種について 450°C における引張試験結果と室温における結果とを比較した。

Fig. 7 はこの関係を示した棒グラフである。図の縦軸は降伏点、引張強さ、伸びおよび絞りを表わしている。図の左半分は各鋼種別に母材 (BM) および溶接継手 (WJ) の室温と 450°C における降伏点と引張強さを表わしたもので斜線を施した棒グラフが降伏点を示している。6NA 鋼母材は前述のように鋼材不足のため高温引張試験ができなかったものでここには示していない。また 6Q および 7QB 鋼の母材は降伏点の測定ができなかった。一般に各鋼種とも溶接継手は母材に比べて室温および 450°C における引張強さは低いようである。また 450°C における引張強さの室温に対する低下も溶接継手のほうが母材より大きいようである。HT 60 鋼 (6NA, 6NB, 6NC, 6Q 鋼) について比較すると 6NB および 6Q) が良好で 6NA 鋼と 6NC 鋼はやや劣る。HT 70 鋼 (7QA, 7QB) について比較すると母材、溶接継手ともに 7QA 鋼のほうが良好で、450°C における強さの室温に対する低下も小さい。

Fig. 7 の右半分は伸びと絞りの図で斜線を施した棒グラフが伸びの大きさを示している。なお 6NA と 7QA 鋼母材の場合伸び測定ができなかったのここには示していない。伸びは前述のように母材試験片は $L/D=50$ mm/10 mm=5 であり、溶接継手試験片は $L/D=60$ mm/10 mm=6 で算出したものでこのままでは比較することはできない。比較するためにはある標準の値に換算しなければならない。そこで現在 WES 規格の低温構造用鋼板判定規程に採用されている換算式¹⁾(1)式を用いて本試験における母材と溶接継手の伸びを比較することにする。

$$\epsilon' = 2\epsilon(\sqrt{A/L})^{0.40} \dots\dots\dots(1)$$

ここに ϵ' = ある試験片についての伸び

L = 標点距離, A = 断面積, d = 直径

ϵ ; $L/D=5$ における伸び

本試験において母材の場合は $L/D=5$ であるからそのままでよいが溶接継手の場合は、 $L/D=6$ であるから母材と同じ $L/D=5$ の場合の伸びに換算しなければならない。そこで(1)式を用いて $L/D=5$ と $L/D=6$ の伸びの比率を本試験の場合について求めると(2)式のようになる。

$$\frac{\epsilon'}{\epsilon''} = \left(\frac{\sqrt{A/L'}}{\sqrt{A/L''}} \right)^{0.40} \dots\dots\dots(2)$$

ここに ϵ' , A' , L' は $L/D=5$ の場合の伸び、断面積、標点距離を表わし、 ϵ'' , A'' , L'' は $L/D=6$ の場合の伸び、断面積、標点距離を表わしている。母材試験片と溶接継手試験片の直径は等しいので(2)式で $A'=A''$ とおける。すなわち伸びの比は(3)式ようになる。

$$\epsilon'/\epsilon'' = (L''/L')^{0.40} \dots\dots\dots(3)$$

$L''=60$ mm, $L'=50$ mm を代入すれば本試験の場合の伸び比が求まる。

$$\epsilon'/\epsilon'' = (60/50)^{0.4} = 1.08$$

すなわち $L/D=6$ の場合の伸びに 1.08 を乗ずれば $L/D=5$ の場合の伸びに換算される。Fig. 7 において、伸びを示した棒グラフの上に点線で示したのが上式で換算した値である。たとえば 6NB 鋼の室温における場合換算された伸びは $18\% \times 1.08 = 19.4\%$ である。この換算された伸びで母材と溶接継手を比較するといずれの鋼種も溶接継手の伸びは母材より小さい。また各供試鋼材同様に母材および溶接継手のいずれもが 450°C における伸びは室温の場合より小さい。しかし絞りは逆に 450°C の場合が大きい値を示している。

以上の結果を総合すると、高張力鋼を高温で使用する場合、概して単純な焼準処理を施した鋼材すなわち A_3 変態点以上に加熱し空冷したままで、あとで焼もどし処理を行わないものが望ましいことが推察できる。

5.2 クリープ・ライブチャ試験

試験に供した全 6 鋼種の母材および溶接継手について 400°C でクリープ・ラプチャ試験を行なった。Fig. 8 は

Fig. 8 Stress-rupture time lines of base metals and welded joints for used steels

その結果を応力-破断時間で整理したもので、いわゆるクリープ・ラプチャ特性図である。図中実線と破線はそれぞれ母材試験片および溶接継手試験片による結果を示

したものである。また実線から破線へ引いた矢印は溶接継手クリープ・ラプチャ強さが母材の場合に比べていかに低下しているかを示したものである。たとえば 6NA, 7QB の溶接継手は母材の場合に比べて、それぞれ 11 および 8 kg/mm² 低下している。Fig. 9 は 6NA 鋼につ

Fig. 9 Creep curves at 450°C for base metal and welded joint of 6NA steel

いてのクリープ伸び線図である。実線は母材試験片の場合、破線は溶接継手の場合である。今母材と溶接継手について、その破断伸びを便宜的に算術平均して比較すると母材の場合は 32.1% であり溶接継手の 14.5% に比べると破断伸びはいちじるしく大きい。同様にして各鋼種の母材と溶接継手について、平均破断伸びを求めた結果が Table 4 である。破断箇所は Table 4 に示したように

Table 4 Mean creep rupture elongation for base metals and welded joints of used steels

Used steel	Base metal L/d=5 (%)	Welded joint L/d=7 (%)	Position of rupture
6NA	32.1	14.5(17.6)	Base
6NB	20.9	14.4(17.4)	Base
6NC	27.2	18.0(21.8)	Base
6Q	14.8	14.1(17.1)	Bond
7QA	13.9	11.6(14.1)	Bond
7QB	13.6	11.7(14.2)	Bond

一般に焼準鋼は母材部調質鋼はボンドで生じている。なお伸び換算比を前節 (3) 式で求めると約 1.21 である。この比率を乗じた値が表中 () で示した値である。

以上の結果から明かなように一般に溶接継手のクリープ・ラプチャ強さは母材の場合に比べて小さい。とくに 6NA 鋼と 7QB 鋼はその差がそれぞれ 11 および 8 kg/mm² でいちじるしい。また 6NC 鋼は母材および溶接継手のいずれの場合も他鋼種に比べていちじるしく低い値を示している。これは高温引張の場合と同様に母材の高温強さがよくないためと思われる。破断伸びは一般に焼準鋼のほうが調質鋼の場合より大きい。また焼準鋼の場合は溶接継手のほうが母材に比べて小さいが調質鋼は逆に溶接継手のほうが大きい。これは溶接に際し母材が受ける急熱急冷の激しい熱サイクルで焼もどし温度以上

に加熱されて溶接熱影響部の調質効果が失われ、破断伸びが大きくなるものと思われる。

各鋼種のクリープ・ラプチャ強さを比較するために、Fig. 8 の結果をもとにして、500時間および 1000時間破断応力を母材に溶接継手の場合について各鋼種別に整理して Fig. 10 に示す棒グラフで表わした。この図より前

Fig. 10 Comparison of creep rupture strength of used steels at 500 hr and 1,000 hr rupture time

述の溶接継手のクリープ・ラプチャ強さが母材の場合に比して低いことがいっそう明らかである。ただ 6Q 鋼のみは溶接継手のほうが母材の場合よりも大きくなっているが、この理由は明らかでない。また 6NA 鋼と 7QB 鋼の溶接継手および 6NC 鋼の母材と溶接継手の場合が他の鋼種に比していちじるしく低いことも明瞭である。この図をもとにして各鋼種を比較してみる。HT 60 鋼母材の場合についてクリープ・ラプチャ強さを大きい順に挙げると、6NB 鋼、6NA 鋼、6Q 鋼、6NC 鋼である。溶接継手の場合は 6NB 鋼、6Q 鋼、6NC 鋼、6NA 鋼の順である。この両方の結果を総合すると 6NB 鋼がもっとも良好である。これは他の HT 60 鋼が焼ならし後低温焼もどし処理あるいは焼入れ焼もどしの調質処理を施しているのに対して単純な焼ならし処理を行なった鋼種であるため高温で使用する際に生ずる焼もどし作用などの影響がまったくなく、また化学成分的に云っても C が高く、Ni は 1% 以上で Mo も 3% と 6Q 鋼について多く入っており炭素当量も他 3 鋼種に比べて高いためと考えられる。しかし 6NB 鋼のように単純な焼準鋼であると、どうしても低温じん性の低下は避けられないので、6Q 鋼、6NA 鋼および 6NC 鋼のような調質処理でこのじん性の向上はかる結果になる²⁾。したがって、高温性能および低温じん性の良好な鋼種を得るためには、化学成分ならびに熱処理法をさらに検討し改善する必要があると思われる。

HT 70 鋼においては、母材のクリープ・ラプチャ強さは 7QB 鋼のほうが 7QA 鋼よりも大きい、溶接継手については逆に 7QB 鋼のほうが小さい。これは Table

1 および Table 2 の化学成分をみて明らかなように 7QB 鋼は 7QA 鋼に比して Mo, Ni にはあまり差がないが, C, Ni, Cr および炭素当量が多いためと考えられる。一方溶接継手の場合はその溶接金属は逆に 7QA 鋼のほうが 7QB 鋼に比して Ni および Mo が多いが, 破断位置は Table 4 に示したように, いずれもボンドである。この個所は溶接熱影響のため組織的に不連続で, 複雑な要素を含んだ部分である。このために, 母材および溶接金属の性質のみから, この原因を考察することは本実験の範囲ではできない。

以上の結果を総合すると一般に炭素当量が大きく, 単純な焼ならしをした鋼のほうが, 炭素当量が低く, 焼ならし後焼もどしまたは焼入れ焼もどしを施した鋼よりもクリープ・ラプチャ強さが大きいことがわかった。なおオーステナイト結晶粒の大小による差は認められなかった。

5.3 高温引張試験結果とクリープ・ラプチャ試験結果との比較

前節までの高温引張試験結果とクリープ・ラプチャ試験結果を比較しよう。Fig. 11 は各鋼種の母材および

Fig. 11 Relation between yield point and tensile strength at 450°C and 500 hr creep rupture strength at 400°C

溶接継手の 450°C における降伏点と引張強さを横軸にとり, これと同じ鋼種の母材および溶接継手の 450°C における 500 時間破断応力を縦軸にとり両者の関連を求めたものである。図より高温引張強さおよびクリープ・ラプチャ強さとはほぼ直線関係にあることがわかった。すなわち高温引張強さおよび降伏点の大きなものはクリープ・ラプチャ強さもそれに比例して大きい。母材については比較的ばらつきが小さいが, 溶接継手の場合はばらつきがかなり大きい。これは母材の場合は組織的に一応均一になっているが, 溶接継手の場合は溶接施工に際し, 急熱急冷の激しい熱サイクルを受け溶接境界部近傍には組織的に不安定な不連続部分ができるため, 大きなばらつきが生ずるものと思われる。また降伏点と引張強さの直線は平行でなく, 強さが大きくなるにつれてその間が狭くなっているのは一般的に高張力鋼の降伏比は引張強さが大きくなる³⁾ほど大きくなるためと思われる。

6. 結 論

供試全 6 鋼種について, 被覆アーク溶接継手および母材の高温引張試験と, クリープ・ラプチャ試験を行なった。これらの結果下記のことを判明した。

1. 一般に高温引張強さおよびクリープ・ラプチャ強さは母材よりも溶接継手のほうが劣るようである。また伸びは高温引張試験の場合は全鋼種とも溶接継手のほうが母材よりも小さい。しかしクリープ・ラプチャ試験の場合焼準鋼は高温引張試験の場合と同様であるが, 調質鋼の場合は逆に溶接継手の破断伸びは大きい。

2. 母材および溶接継手の高温引張強さは調質鋼の場合は 300°C から, 焼準鋼の場合は 350°C からそれぞれ減少し始める。

3. 溶接継手の高温引張試験における切断個所は試験温度が高くなるにしたがって母材部より溶接金属部へ移行する傾向がある。本試験においては焼準鋼よりも調質鋼のほうが高い温度で溶接金属部切断を生じた。

4. 高温引張試験の結果高張力鋼を高温で使用する場合は単純な焼準鋼すなわち焼ならしのままで, あとで焼もどした処理を行なわないものをもっとも望ましく, つぎは焼入れ焼もどし処理を行なったいわゆる調質鋼である。

5. クリープ・ラプチャ試験の結果 HT 60 鋼, HT 70 鋼とも化学成分的には C, Ni, Cr, Mo を多く含有し, 炭素当量が高いほうが破断応力は大きい。熱処理としては高温引張試験の場合と同様単純な焼準処理を行なったもののもっとも良好な結果を示した。

6. 高温引張とクリープ・ラプチャ試験の両者の結果を比較すると, 高温引張強さおよび降伏点の大きいものはそれに比例してクリープ・ラプチャ強さも大きいようである。

以上のように高温引張およびクリープ・ラプチャ試験結果のみからみれば原子炉用高張力鋼としては非調質鋼のほうが望ましいと考えられる。しかし単純な焼準鋼では低温じん性の低下は避けられないので, 焼ならし後強制冷却あるいは焼もどしなどの熱処理の工夫を行なってこのじん性の向上をはかる必要がある。したがって高温性能および低温じん性の両者を同時に満足させる適正な熱処理条件の選定は今後の重要な研究課題と考えられる。

本実験に際し協力していただいた八幡製鉄, 富士製鉄, 日本鋼管, 日本製鋼, 三菱製鋼の各製鋼会社および新三菱重工神戸造船所, 石川島播磨重工業, 富士電機川崎工場, 三菱電機伊丹製作所, 三菱造船長崎造船所, 呉造船所の各溶接施工会社ならびに金属材料技術研究所実習生柿崎達雄君に深甚の謝意を表す。

文 献

- 1) 日本溶接協会 “WES 規格低温構造用鋼板判定規程(案)” 溶接技術 9 巻 (1961 年) 2 号 1-7.
- 2) 木原博, 鈴木春義, 田村博 “Researches on Weldable High Strength Steels” 造船協会 60 周年記念叢書, 1 (1957), 47.
- 3) 鈴木春義 “溶接構造用高張力鋼とその問題点” 溶接技術 10 巻 (1962) 1 号 1-16.