原子炉用 HT 70 鋼大型溶接継手のクリープラプチャ に関する研究 (第4報)*

—破断様相に対する検討—

岡 根 功** 稲 垣 道 夫**

A Study on Rupture Properties of Large Welded Specimens of HT70 Steel for Nuclear Pressure Vessels (Report 4)*

—Some Discussions on Creep Rupture Configuration—

by Isao Okane** and Michio Inagaki**

Abstract

In the foregoing reports, comparison in creep rupture strength between large and small size welded specimens, discussion on the mechanism of creep rupture and the influence of heat treatment after welding were made. In this report, the difference in rupture configuration between large and small size welded specimens, and welding methods viewed from creep rupture configuration are discussed.

The large size welded specimens are ruptured at the heataffected zone of base metal (HAZ) near the bond, while the small size welded specimens are ruptured at HAZ near the base metal. The plate thickness of the steel used is 30 mm, and the welded joints are made by multi-layer welding. Therefore, it may be considered that the properties at welded joint of specimens of both sizes are different. It is clear from the foregoing report that creep strength may be proportionate to the absorbed energy to rupture in a high temperature tensile test. Therefore, tensile tests at 450°C on synthetic HAZ specimens, with respect to the coarse grain part near bond and the fine grain part near base metal in HAZ of small size welded specimens, are carried out to measure the absorbed energy. The value of absorbed energy in fine grain part is less than that in coarse grain part. Consequently, it may be considered that small size welded specimens are ruptured at fine grain part of HAZ near base metal, while large size welded specimens are ruptured at coarse grain part of HAZ near bond.

The creep rupture configurations of large size specimens are discussed in various ways. As a result, it is believed to be desirable for improving the creep rupture strength of welded joint to make the penetration of the final bead as shallow as possible.

1. 緒 言

前報までに、原子炉圧力容器用として試作された板厚 30 mm の 70 キロ級 Mn-Cr-Mo-B 系調質型高張力鋼溶接継手のクリープ破断試験を、大型および小型継手試験片で実施して、破断強さの比較¹⁾および大型継手試験片の破断機構の検討²⁾を行なった。本報では、主として、大型継手試験片と小型継手試験片の破断状態の相違についての検討およびクリープ破断状態からみた溶接施工法の検討結果について報告する。

2. 大型継手試験片と小型継手試験片の クリープ破断状態についての検討

第1報で報告したように実物大の溶接継手断面をその

まま有する大型継手試験片と溶接継手中央部付近より採取した小型継手試験片のクリープ破断状態は異なっている。Phot. 1 および Phot. 2 は大型継手試験片および小型継手試験片の破断状態の一例をそれぞれ示したものである。これらの写真より明らかなように、大型継手試験片の破断は溶接境界線に沿った母材熱影響部粗粒域で生じているのに対して、小型継手試験片のそれは、母材熱影響部のうち母材原質部に近接した微粒域で生じており、両者の破断箇所は異なっている。第2報においては大型継手試験片の破断が Phot. 3 に示すように、破断にいたるきれば、まず溶接止端部で発生し、これが母材熱影響部のうち、溶接境界線に近接した粗粒域のオーステナイト粒界を選択的に進行して破断にいたるのに着目し、溶接止端部近傍の母材熱影響部組織を小型試片に再現して、破断機構の検討を行なった。この大型継手試験片のクリープ破断に対する検討結果は小型継手試験片の

* 原稿受付 昭和43年3月4日

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

Test temp. 400 °C
Stress 24.0 kg/mm²
Rupture time 440 hrs.

Photo 1 An example of creep rupture configuration for large size welded specimen

Test temp 400 °C
Stress 58.0 kg/mm²
Rupture time 469 hrs.

Photo 2 An example of creep rupture configuration for small size welded specimen

場合には適用できない。これは次のような理由によるものと考えられる。

本研究で使用した鋼板の板厚は 30 mm で溶接は当然多層盛で行なわれている。このため、継手部より採取された小型継手試験片の母材熱影響部は多重溶接熱サイクルを受けていることになる。この結果、母材熱影響部は相続く溶接熱サイクルによって、繰返し熱処理を受けたことになる。このため、小型試験片を採取した位置における母材熱影響部の材質は、大型継手試験片のクリープ破断試験において、最初のきれつ発生個所である溶接止端部近傍の母材熱影響部のそれと異なっていると想像され、これが両試験片の破断状態に差異を生ずるおもな原因と考えられる。本報では、小型継手試験片のクリープ破断状態を検討して、この結果と第 2 報で検討した大型継手試験片の破断状態についての検討結果とを比較し、両試験片の破断状態の差異について検討を行なった。

Test temp. 400 °C
Stress 24.0 kg/mm²
Rupture time 440 hrs.

Photo 3 Photomicrograph of cracks occurred in HAZ of large size welded specimen (×100)

小型継手試験片の採取位置に相当する継手断面の板厚中心部熱影響部における溶接熱サイクルを実測した。Fig. 1 は本実験供試鋼板と同一組成を有する板厚 50 mm の鋼板で前述のクリープ破断試験における継手試験片作成の場合と相似の開先形状および溶接条件で多層盛溶接を施工し、各層溶接施工が相続いて行なわれているとき、溶接境界部近傍の母材熱影響部に相当する部分における溶接熱サイクルより最高到達温度を求め、各溶接パス数に対して図示したものである。この結果を参照し、小型丸棒試験片に多層盛溶接の場合の板厚中心部附近の

Fig. 1 Maximum heating temperature at HAZ of base metal, submitted to multi-layer welding

熱影響部を再現した。この再現した母材熱影響部は大型継手試験片のクリープ破断個所である溶接境界線に沿った母材熱影響部粗粒域と小型継手試験片のクリープ破断個所である母材原質部に近接した熱影響部微粒域の2種類である。この再現熱影響部試験片について、常温および450°Cでの引張試験を行ない、この結果より第2報で検討した方法と同様に破断までの吸収エネルギーを比較した。Table 1 は常温および450°Cでの引張試験結

Table 1 Results of tensile test for synthetic HAZ specimens, synthesized the coarse and fine grain parts in HAZ of small size welded specimen

Specimen	Temperature	Tensile Strength	Elongation*
Coarse Grain	Room	106 kg/mm ²	10.4%
	450°C	85.7	12.8
Fine Grain	Room	101	11.2
	450°C	84.6	12.0

*) Gauge Length; 30mm

果を示したものである。この試験結果は繰返し3本の試験片による結果の平均値である。繰返し試験結果のばらつきは最大5%であった。この結果にもとづいて、第2報で報告したのと同様破断までの吸収エネルギー比をもとめた。吸収エネルギー比は粗粒域の場合を基準にしている。すなわち、

$$E_c : E_f = 1 : (\sigma_f / \sigma_c)(B/A) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで

E ; 繰返し熱サイクルを受けた再現熱影響部試験片の破断までの吸収エネルギー。添字 c および f はそれぞれ熱影響部粗粒域および微粒域の場合を示す。

σ ; 繰返し熱サイクルを受けた再現熱影響部試験片の引張強さ。添字 c および f はそれぞれ熱影響部粗粒域および微粒域の場合を示す。

A, B ; 繰返し熱サイクルを受けた再現熱影響部試験片の粗粒域、微粒域の引張破断伸び。

この式に Table 1 の結果を代入すると

$$E_c : E_f = 1 : 1.02 \quad (\text{常温の場合})$$

$$E_c : E_f = 1 : 0.92 \quad (450^\circ\text{C の場合})$$

で、常温では母材熱影響部微粒域は粗粒域に比べて、破断までの吸収エネルギーはわずかに大きい、450°Cでは逆に小さくなる。この結果、継手部より採取された小型継手試験片の本研究での温度範囲(400~500°C)におけるクリープ破断試験では溶接境界線に近接した母材熱影響部粗粒域に比して、母材原質部に近接した微粒域のクリープ破断強さは小さいことが推定できる。

以上の結果および小型継手試験片の形状が丸棒試験片であるため、継手部での形状的な応力集中度は低く、さらに、前述のように繰返し熱処理効果に相当する熱履歴を受けているために大型継手試験片より延性に富み、応力集中効果が減少していると想像できることをあわせて考えると、そのクリープ破断は、大型継手試験片において溶接境界線に近接した母材熱影響部粗粒域で生じると異なり、母材原質部に近接した熱影響部微粒域で生じることが推察できる。

3. 破断状態にもとづく溶接施工法の検討

第1報および第3報³⁾で明らかにしたように本研究の場合、溶接継手断面をそのまま有する大型継手試験片のクリープ破断状態は Fig. 2 に示すように2種類に分類することができる。すなわち、Fig. 2 (I) のように溶

Fig. 2 Creep rupture configurations of large welded specimen

接境界線に沿って溶接金属の片側のみで破断する場合と同図(II)で示すように溶接金属を斜めに横断している場合の2種類である。これらの破断にいたるきれつの発生およびその進行状況は、前報までに詳細に述べたように、いずれの場合もまず溶接止端部できれつが発生し、これが溶接境界線に沿った母材熱影響部粗粒域を進行し破断にいたる。このように破断にいたるきれつの進行状況が上述の2様相の破断状態において、同じである事実を考えるとこの両者の相違は最初に発生するきれつの状況のみに左右されるものと推定することができる。Phot. 4 は溶接金属を斜めに破断線が横切っている一例である。この写真で明らかのように、きれつの最初に発生すると考えられる4個所の溶接止端部のうち、破断にいたるきれつが発生している個所と、そうでない個所との状態に相違が認められる。すなわち、破断にいたるきれつが発生している溶接止端部では溶接ビードの境界線が母材板面となす角度と開先線からの距離、すなわち、Fig. 3 に示した θ と l が他の溶接止端部におけるそれに比して小さいことが明らかである。

通常、母材と溶接金属とは化学組成および組織が異な

Test temp. 450 °C
Stress 20.0 kg/mm²
Rupture time 70 hrs.

Photo 4 An example of cross ruptured line for large size welded specimen

Fig. 3 Cross section of welded joint

っている。この結果、溶接継手部の機械的性質は溶接境界線で不連続的に変化している。また、溶接止端部は、本供試鋼板のように板厚が 30 mm でアーク溶接を施工する場合は、通常、母材の開先形状は X 型、U 型、H 型とするが、いずれの形状によっても溶接境界線と母材板面との間はある角度を有するのが一般である。これらのことから溶接止端部は一種の切欠で応力集中点になると考えられる。この応力集中度は切欠形状に左右されるのが一般である。すなわち、一般に切欠の角度の小さいほど、切欠底部の曲率半径の小さいほど、切欠の深いほど応力集中度は大きい。一般に、クリープ破断強さは切欠の存在によって強化される場合と逆に劣化される場合とが考えられる⁴⁾。すなわち、供試材が著しく変形しやすい場合は、切欠底部は応力集中によって、局部的に塑性変形し、このために応力集中度が緩和される結果クリープ破断強さが強化される。これに対して、供試材が変形し難い場合、析出物が粒界に凝集しやすい場合は逆に劣化する。本研究の場合、第 2 報で明らかにしたように、き裂の発生およびその進行経路にあたる母材熱影響部粗粒域では、温度の上昇にしたがって延性が減少する。

とくに、本研究のクリープ破断試験温度範囲 (400~500 °C) では、ほとんど延性を示さない。また、本研究の供試材のような低合金鋼溶接熱影響部を高温で長時間加熱すると最終的には、フェライトの粗大化および析出物の粒界凝集のため材質がぜい化する傾向がある⁵⁾。

以上の理由で本研究に用いた試験片では、切欠の存在によってクリープ破断強さが劣化する傾向にあることが推定できる。この結果、本研究での溶接継手においては、まず応力集中度の大きい個所、すなわち、Fig. 3 において θ および α の小さい個所で、まずき裂が発生するものと考えられる。このうち、 θ は溶接余盛を削除した場合も同様な破断状況に示すことから、主として、き裂の進行に関係するように思われる。いっぽう、 α は第 1 報で報告したように、溶接余盛削除によって、クリープ破断寿命が延びることから、き裂の発生時期に関係があるようである。このようにして発生したき裂の先端は鋭い切欠で、最初に溶接止端部でき裂が発生した場合と同じ状態で新たなき裂が発生し、これが繰返され逐次き裂は拡大する。この結果、負荷荷重に対する試験片の有効断面、すなわち、未破壊部分における真応力が材料の極限強さに達すると破断する。また、開先線からの距離 l が大であるということは、本研究での破断にいたるき裂は溶接境界線に沿った母材熱影響部粗粒域を選択的に進行している、この進行を阻止するのに効果があるように考えられる。

以上の結果より、溶接継手のクリープ破断強さを向上させるには、溶接止端部における溶接境界線と母材板面との間の角度と開先線からの距離、すなわち、Fig. 3 で示した θ と l をでき得る限り大きくしたほうが望ましい。このためには、溶接止端部を形成する最終溶接層の施工に際しては、でき得る限り浅く広い溶込みになるような溶接法および溶接条件を選定することが望ましいと考えられる。

4. 結 論

原子炉圧力容器用として試作された板厚 30 mm の 70 キロ級 Mn-Cr-Mo-B 系調質型高張力鋼溶接継手について、本研究で実施したクリープ破断試験における大型継手試験片と小型継手試験片の破断状態の相違および破断状態からみたクリープ破断強さ向上のための溶接施工法について、種々検討した結果下記のことが判明した。

(1) 本研究の供試鋼板は板厚が 30 mm であるため、当然溶接は多層盛で施工される。したがって、この継手部より採取された小型継手試験片の母材熱影響部は相続く溶接熱によって、繰返し熱処理をうけたものになっている。このため、母材熱影響部の材質は実物大の継

手断面をそのまま有する大型継手試験片の破断に至るきれつの発生点である溶接止端部近傍の最終層の溶接熱のみをとくにうけた母材熱影響部の性質と異なっていることは明らかである。この繰返し熱処理をうけた小型継手試験片の母材熱影響部各部を小型丸棒試験片に再現し、第2報で大型継手試験片の破断状態を検討したのと同じ方法で検討した。すなわち、450°C で引張試験を行ない、それぞれの破断までの吸収エネルギー比で熱影響部各部のクリープ破断強さを比較した。この結果、小型継手試験片のクリープ破断箇所である母材原質部に近接した熱影響部微粒域の破断までの吸収エネルギーが他の部分に比してもっとも小さいことが判明した。この結果と丸棒試験片であるため応力集中度が大型継手試験片に比して小さいことをあわせて考えると小型継手試験片のクリープ破断は、大型継手試験片においては溶接境界線に近接した母材熱影響部粗粒域でそれが生じている事実と異なり、母材原質部に近接した熱影響部微粒域に生じていることが推察できる。

(2) 溶接継手断面をそのまま有する大型継手試験片のクリープ破断状態を種々検討した結果、破断は溶接止端部の状態に左右されることが判明した。この結果、溶接継手のクリープ破断強さを向上させるには、溶接止端

部における最終溶接層はでき得る限り浅く広い溶込みになるような溶接法、溶接条件を選定するのが望ましいことが明らかにされた。

以上の結果と前報までの結果とを総合すると、現状では溶接継手のクリープ破断強さを設計資料とする場合、じゅうらいの継手部より採取した小型継手試験片による結果を用いるのでは適切でなく、実物大の溶接継手断面を有する大型継手試験片による結果を基礎にする必要があることが明確となった。

本研究は昭和35~39年度の科学技術庁原子力平和利用委託研究の一環として行なったものである。

参考文献

- 1) 鈴木, 稲垣, 岡根, “原子炉用 HT 70 鋼大型溶接継手のクリープラプチャに関する研究 (第1報)”, 溶接学会誌, Vol. 32 (1963), No. 9, p. 805~811
- 2) 岡根, “原子炉用 HT 70 鋼大型溶接継手のクリープラプチャに関する研究 (第2報)”, 溶接学会誌, Vol. 34 (1965), No. 9, p. 903~910
- 3) 稲垣, 岡根, “原子炉用 HT 70 鋼大型溶接継手のクリープラプチャに関する研究 (第3報)”, 溶接学会誌, Vol. 37 (1968), p. 621~626
- 4) 宮川, “クリープ変形理論と設計”, 日刊工業新聞社, p. 304~340
- 5) 稲垣, 岡根, 鈴木, “原子炉用 60キロ級高張力鋼溶接部の長時間加熱による材質の変化”, 溶接学会誌, Vol. 33 (1964), No. 11, p. 1010~1018

日本工学会第23回見学会の催し

日本工学会で下記により見学会を催します。奮ってご参加下さい。

記

日時 10月15日(火) 13.30~15.00

見学先 通常郵便自動区分機(東京中央郵便局)

今夏初めて稼動し出した新装置について、メーカー東芝電気の技術者の説明をお願いすることにしました。

集合 当日 13.30 に東京中央郵便局(東京駅丸ノ内南口前)玄関(駅と丸ビルの側に各一あり)からエレベータで昇って4階の第1会議室に集合のこと。

定員 100名に限り先着順に参加証をお届けします。

申込期限 10月5日 ハガキに第23回見学会申込と書き、氏名、所属学会、勤務先、連絡先を記入して日本工学会宛 申込むこと。

東京都港区芝罘平町35 日本造船学会内 日本工学会 電話 502-2049