

論 文

UDC 620.192.63 : 539.4.014 : 620.173.26

オーディング・リング法によるいくつかの実用鋼の
応力緩和試験*

篠田 哲守**・島貫 静***・佐々木良一****

Stress Relaxations Test on Some Commercial Steels Using
the Oding Ring Method

Tetsumori SHINODA, Shizuka SHIMANUKI, and Ryoichi SASAKI

Synopsis :

Stress relaxation data for some commercial steels were obtained by means of the ring method originated by Oding, and were compared with that obtained by the conventional tensile method. The data obtained by the ring method agreed with the tensile data within an error 10%, comparing the remaining stress ratio, RSR (residual stress/initial stress). This agreement, however, was impaired when the ring specimen was loaded to an initial stress greater than its yield strength. The initial stress in the ring test specimen was capable of being set to an arbitrary value to an error of less than 6% by using the unique relationship between the initial gap spacing of the ring specimen and the shape constant, A. The stress relaxation tests under an-isothermal conditions were easy to perform using the ring test method. The value of RSR in isothermal part of the test was influenced by the heating rate to reach the test temperature, within only the first 3 or 4 hours of the test.

1. 緒 言

鋼部材中の残留応力除去の基本的課題は、鋼部材に与えられた諸性質を損なわずに、残留応力を所定の値まで減少させる点にあらう。このような課題を解決する方法の一つとして、鋼部材より切り出した試片について基本的な応力緩和データを取ることが必要とされている。その際、恒温下のデータばかりでなく、昇温途中などの変温下のデータも取れば、実際の残留応力除去過程を知る上で都合がよい。

このような試験目的のもとでは、JIS 規定にあるような引張りラクセーション法¹⁾ (以下引張試験法と略す)によらなくとも、より簡便な方法で求めたデータで十分な場合が多い。さらに引張試験法では変温下のデータをとる際に試験片の熱膨脹除去といったやつかいな問題が付随する²⁾。Одинг によつて開発されたリング法 (以下リング試験法あるいは単にリング法とする)^{3)~5)} では変温下のデータが容易に求められ、簡便法として注目に値するものと考えられる。

著者らは以前、リング法の有用性について述べたことがあるが⁶⁾、本報告ではさらに広範な鋼種につき実験を行い、その有用性を再確認した。あわせて従来ほとんど検討されなかつたリング法による1) 応力緩和と性質測定の精度、2) その精度に影響する因子、および3) 変温下での応力緩和と性質測定の可能性について検討した。

2. 素材および実験方法

2.1 素 材

Table 1 に本実験に用いた鋼種、化学組成、熱処理、および室温での 0.2% オフ・セット耐力、 σ_r 、を示す。ASTM タイプの A533B, A542 および A543、それにいわゆる 80 kg/mm² 級高張力鋼 HT80 を加えた4鋼種の試験片は、Table 1 に示す熱処理を施した圧延鋼板より、試験片の応力負荷方向が素材圧延方向に垂直 (Table 中 V) あるいは平行 (P) となるように、切り出した。A543 および HT80 において、(1) および (2) とあるのは、前者が通常の調質鋼であるのに対し、後者は溶体化後焼入または適当な速度で冷却したままの鋼の違いを

* 昭和 54 年 10 月 30 日受付 (Received Oct. 30, 1979)

** (株)日立製作所日立研究所 (現:東京工業大学) 工博 (Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd., Now Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuda-cho Midori-ku Yokohama 227)

*** (株)日立製作所日立研究所 (Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.)

**** (株)日立製作所日立研究所 工博 (Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.)

Table 1. Chemical compositions (wt%) and heat treatments for the test specimens.

Steels	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Cr	V or Cu	Heat-Treatments ¹⁾	σ_y ²⁾	SD ³⁾
A533B	0.17	0.27	1.20	0.019	0.014	0.59	0.54	Tr	V : Tr	900°C, WQ & 650°C, 4h, AAC.	52.3	V
A542	0.13	0.23	0.43	0.009	0.007	0.06	1.02	2.29	Cu : 0.07	950°C, AAC & 610°C, 4h, AAC.	74.3	V
A543(1)	0.17	0.33	0.37	0.011	0.004	3.44	0.53	1.68	Cu : 0.12	915°C, AAC & 650°C, 4h AAC, 915°C, AAC.	65.5	V
A543(2)											—	
HT80(1)	0.12	0.26	0.76	0.005	0.004	1.00	0.50	0.49	V : 0.02, Cu : 0.23	930°C, RQ & 650°C, 40min AC. After the above, 1 100°C, 2min, OQ.	80	P
HT80(2)											—	
STPA24	0.11	0.37	0.50	—	—	—	0.93	2.00	—	935°C, 9h, BAC, 750°C, 20h, FC.	26.6	V
18-8	0.06	0.40	1.28	0.005	0.020	9.59	—	19.2	—	1 100°C, OQ.	16.4	V

1) AC : air cooling, FC : furnace cooling, ACC : cooling at 60°C/min, BAC : cooling at 600°C/h, RQ : roll quenching, WQ : water quenching, and OQ : oil quenching.

2) σ_y : 0.2% offset yield strength (kgf/mm²).

3) SD : stress direction. V and P show the stress directions perpendicular and parallel to the rolling one, respectively.

示す。

以上4鋼種に加えて、JIS タイプ STPA24 およびいわゆる 18-8 を試験鋼種とした。これら鋼素材は表に示す熱処理を施した鍛造棒で、試験片はその応力負荷方向が鍛造方向に対し垂直となるように切り出した。

2.2 実験方法

実験は、1) 一定温度下での応力緩和データを以下に述べるリング法により求める、2) 前項の結果との比較のため引張試験法により応力緩和データを求める、および3) 変温下での応力緩和データをリング法により求める、以上3つより構成されている。

(1) 一定温度下でのリング試験

リング試験法についての詳細は文献³⁾および⁴⁾に譲るが、その特徴は Fig. 1 に示すような偏心リング試験片の切れ目、D、にくさびを挿入することにより、応力緩和部、ABC、に一樣曲げ応力を発生させる点にある。緩和部分の引張側および圧縮側表面の最大ひずみをそれぞれ ϵ_{ti} と ϵ_{ci} (i は測定箇所の別を示す) とすると、次式で定義される平均ひずみ ϵ が求められる。

$$\epsilon = \sum_{i=1}^3 (|\epsilon_{ti}| + |\epsilon_{ci}|) / 6 \quad (1)$$

一方、 ϵ は切れ目幅の変化率 δ と比例関係にある⁶⁾。すなわち

$$\delta = A\epsilon, \quad (2)$$

ここで比例定数 A は試験片の形状に依存するので以下“形状係数”と呼ぶ。また δ はくさびを挿入する以前の

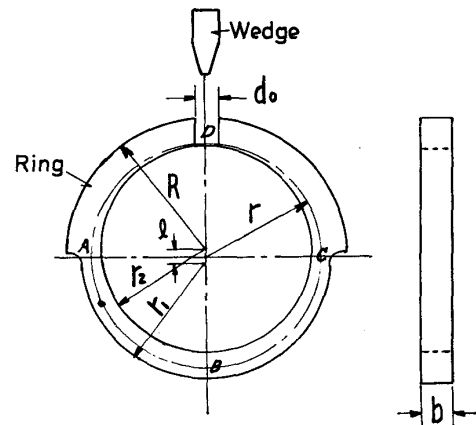


Fig. 1. Schematic discription of the Oding ring specimen.

切れ目幅 d_0 および取りはずした後の切れ目幅 d により、

$$\delta = (d - d_0) / d_0 \quad (3)$$

と定義される。

試験開始前、すなわち加熱開始前の室温での初期応力 σ_0 および所定時間試験後(加熱後)の室温での残留応力 σ は次式で定義される⁶⁾。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_0 &= E\epsilon^i \equiv Ed^i / A \equiv E(d^i - d_0) / Ad_0 \\ \sigma &= E\epsilon' \equiv E\delta' / A \equiv E(d^i - d') / Ad_0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで E は室温のヤング率であり、上添字 i のついた量は試験前の値を、同じくプライムのついた量は試験後の値を示す。以下、残留応力比(Remaining Stress Ratio : RSR)

$$RSR \equiv \sigma / \sigma_0 = (d^i - d') / (d' - d_0) \quad \dots\dots\dots (5)$$

を定義し、試験結果を整理した。試験は 1 温度 1 試験片とし、所定時間加熱しては d' を測定し、再び加熱し試験を継続した。切れ目幅の測定には工具顕微鏡を使用した。試験片の加熱は試験片を試験温度の塩浴中に所定時間挿入して行つた。試験中の塩浴温度変化は $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内であつた。試験片を塩浴に挿入した瞬間から取り去る瞬間までの時間を t_i とし、試験片温度が塩浴温度に等しくなるまでの時間を t_h とするとき、 $t_i - t_h$ で試験時間 t を定義した。500~600°C (773~873 K) の塩浴の場合、 t_h は約 1 min であつた。

(2) 引張応力緩和試験

平行部径 10 mm、ゲージ長さ 50 mm の引張試験片を用い、インストロン型引張試験機により、ゲージ部ひずみについての定ひずみ制御応力緩和試験を行つた。リング試験法との比較のため、初期ひずみをリング試験片でのそれ、 ϵ^i に等しくなるようにした。試験片を所定温度まで昇温後、温度が安定するまでの数時間を経過させ、ただちに 0.3%/min のひずみ速度で所定の所期ひずみに至るまで負荷し、緩和試験を開始した。

(3) 変温下でのリング試験

リング試験法により、a) 所定の加熱速度で昇温する途中の RSR の測定、および b) 梯形状温度変化を与えた場合の RSR の測定の 2 つの測定を行つた。梯形状温度変化は温度の異なる 2 つの塩浴に試験片を交互に挿入することによつて与えた。

3. 実験結果

3.1 一定温度下でのリング試験

Fig. 2 に RSR と時間の対数関係の代表例を示す。これらは 1 つの試験片を用い、間欠的に RSR を測定して得たものであるが、炉から試験片を取り出す影響はほとんど認められなかつた。図には 1 例として、STPA24、 $\sigma_0 = 39.7 \text{ kgf/mm}^2$ (389 MPa) につき、途中の測定を省いて 4 h まで試験を継続した結果が黒丸印で示されている。

鋼種による RSR の温度、時間依存性を系統的に比較するため、RSR と Larson-Miller のパラメータ LMP の関係で整理したのが Fig. 3 である。これより、ある LMP 値での RSR を A542、HT80(1)、A533 および A543(1) の 4 鋼種について比較すると、この順に残留応力除去が困難であることがわかる。初期応力を 20 kgf/mm² (196 MPa) と 40 kgf/mm² (392 MPa) に変えた場合の RSR の差 (図中 a, b で示された 2 本の実線の差) は、鋼種により若干の相違はあるが、初期応力を 32~

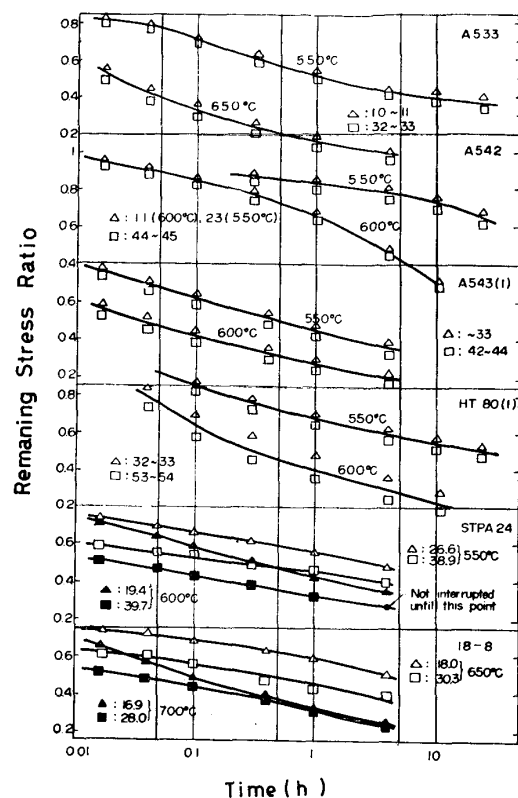


Fig. 2. Remaining stress ratio (RSR) vs. time curves by means of the ring method. The initial stresses, σ_0 , are shown beside each curve in the unit of kgf/mm².

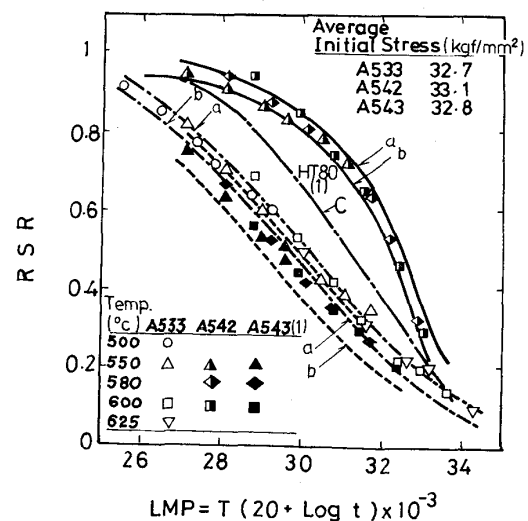


Fig. 3. Unique relationship between the RSR and the Larson-Miller parameter, LMP. T : Rankine temperature, and t : time in hour. 'a' and 'b' denote the curves for $\sigma_0 = 20$ and 40 kgf/mm^2 , respectively, and 'c' the curve for $\sigma = 40 \sim 43 \text{ kgf/mm}^2$.

33 kgf/mm² (314~324 MPa) 程度に揃えて、マスター曲線表示した場合のデータのばらつき幅程度であつた。初期応力の RSR におよぼす影響をみたのが Fig. 4

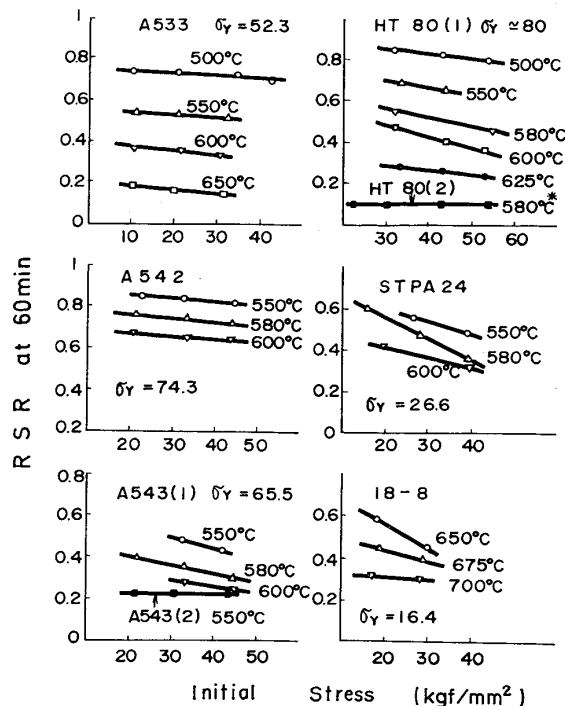


Fig. 4. Effect of the initial stress on the RSR at 60 min.
 σ_y : 0.2% offset yield strength in kgf/mm²,
 *) The value of RSR for HT80(2) are the one at 36 min.

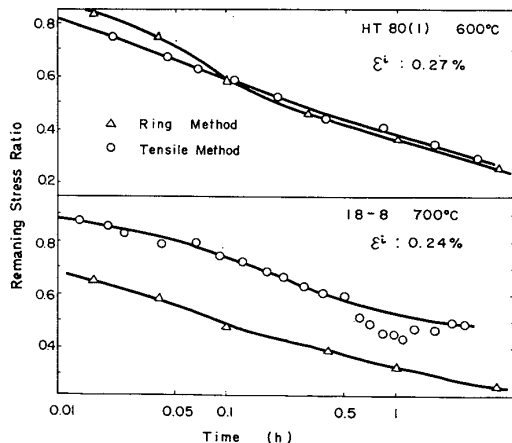


Fig. 5. Comparison of the RSR vs. time curves obtained by means of the ring (Δ) and the tensile ($\circ$) methods.

である。この場合、RSR は 1 h の値である。図中の曲線の初応力軸に対する勾配は鋼種および温度によって変わっている。また熱処理によっても異なっており、特に溶体化温度より急冷した (2) の熱処理のものでは、RSR は σ_0 にほとんど依存しなかつた。

3.2 リング法と引張試験法との比較

Fig. 5 に初期ひずみ ϵ^i をほぼ等しく設定したリング法と引張試験法の結果の比較例を示す。これらは両法の

結果が比較的良好に一致する場合と、かなり異なる場合の例である。Table 2 に比較の全体を示す。表中、初期応力 σ_0 や初期ひずみ ϵ^i の値は、リング法については先に定義した室温での値 (R で示す) であり、引張試験法については試験温度での測定値 (A で示す) である。かつこの数値は両試験法の RSR 値の相対誤差、すなわち (引張りによる RSR-リングによる RSR)/(引張りによる RSR) を示す。表より、HT80(1) では両試験法の結果は相対誤差 10% 以内で比較的良好に一致していることがわかる。しかしリング法による RSR のほうが引張試験法によるそれより全体的に低目の傾向が認められる。また STPA 24 および 18-8 では、初期ひずみ ϵ^i をそろえたにもかかわらず、両試験による結果の一致はよくない。

3.3 変温下でのリング試験

Fig. 6 に種々の速度で昇温し、所定温度に達した後恒温下で応力緩和させた場合の RSR の変化を示す。図よりわかるように、加熱速度の遅いほど、昇温中の RSR の減少程度が大きいという常識的結果となつてはいるが、緩和抵抗の大きい A542 では昇温速度による影響は小さくなっている。一方、昇温速度の影響は、恒温下での時

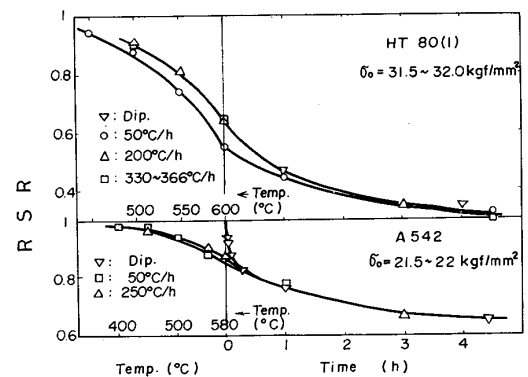


Fig. 6. Stress relaxation behaviors during the heating and the subsequent isothermal parts of the test.

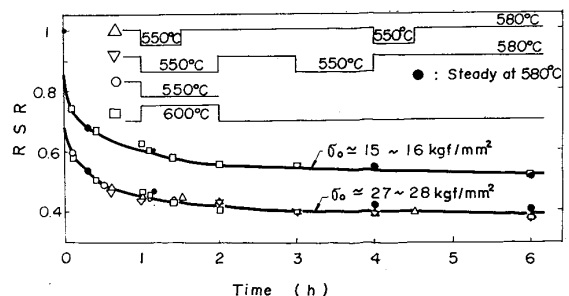


Fig. 7. Effects of the trapezoid temperature variations on the stress relaxation behavior of STPA 24.

Table 2. Comparison of the values of RSR obtained by means of the ring (R) and the tensile (A) methods.

Steels	Temp. (°C)		σ_0 (kgf/mm ²)	ϵ^i (%)	Remaining Stress Ratio (σ/σ_0)		
					0.1 h	1 h	2 h
HT80(1)	550	A	29.5	0.22	0.87	0.66	0.62
		R	44.0	0.23	0.84 (0.035)	0.65 (0.015)	0.61 (0.016)
	580	A	27.3	0.22	0.70 (0.000)*	0.48 (-0.042)†	0.42 (-0.095)†
		R	55.3	0.29	0.64	0.45	0.41
		R	31.8	0.22* 0.16	0.70* 0.75	0.50* 0.55	0.46* 0.51
	600	A	15.6	0.16	0.69 (0.000)	0.50 (0.060)	0.44 (0.061)
		R	31.9	0.17	0.69	0.47	0.41
		R	24.2 44.2	0.22 0.23	0.70 0.65 (0.071)	0.45 0.40 (0.111)	0.39 0.34 (0.128)
	625	A	27.8	0.27	0.69 (0.071)	0.38 (0.053)	0.32 (0.031)
		R	53.0	0.27	0.69	0.36	0.31
STPA24	600	A	13.3	0.18	0.63 (0.17)	0.44 (0.27)	0.40 (0.33)
		R	39.7	0.18	0.42 (0.079)	0.32 (0.045)	0.27 (0.075)
		R	19.4	0.08	0.58	0.42	0.37
18-8	650	A	9.1	0.29	0.86 (0.21)	0.78 (0.26)	0.48 (0.42)
		R	18.0	0.29	0.68	0.58	0.28
	700	A	8.5	0.24	0.73 (0.34)	0.52 (0.39)	0.48 (0.42)
		R	16.9	0.24	0.48	0.32	0.28

Note) The figures in parentheses show the error of the RSR of 'R' relative to that of 'A'.

*) The averages of the RSR in the two ring tests with $\epsilon^i=0.29$ and 0.16%.

†) These errors are relative to the averaged RSR.

間経過とともに減少し、3~4 h 後にはほとんど消失している。

Fig. 7 は STPA 24 につき、試験温度を梯形状に変化させた場合のリング試験結果を示す。温度の増加または減少に伴って、緩和速度に若干の変化が認められたが、基準温度 (580°C) 下での恒温試験の結果との差は総じて小さかった。

4. 考 察

4.1 引張試験法との比較およびリング法の精度

リング法と引張試験法による結果の差であるが、先にみたように σ_y の比較的大きい HT80(1) では両法による RSR は比較的良好に一致しているのに対し、STPA24 および 18-8 のように σ_y の比較的小さい鋼では両法による RSR 値はかなり異なっている。この不一致の原因は主に初期負荷条件の差によると考えられる。Fig. 8 によつて、両試験法の初期負荷時の差を考えてみよう。Fig. 8(a) のように、両法の σ_0 と ϵ^i の関係が完全に

弾性域にある場合は、リング法において室温で負荷した初期応力は昇温による弾性率の低下に伴って、試験片が昇温中に完全拘束のもとにあると仮定して、A 点より B 点まで降下する。したがって、この場合は引張試験法での σ_0 - ϵ^i 関係 (TB 線) に沿って到達される初応力と一

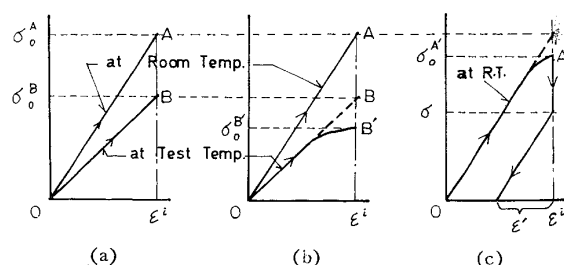


Fig. 8. Comparison of the initial loading curves obtained in the ring and the tensile tests. (a) Completely elastic in both the ring (OA) and the tensile (OB) tests, (b) elastic in the ring (OA), but elasto-plastic in the tensile (OB') tests, and (c) elasto-plastic in the ring test (OA').

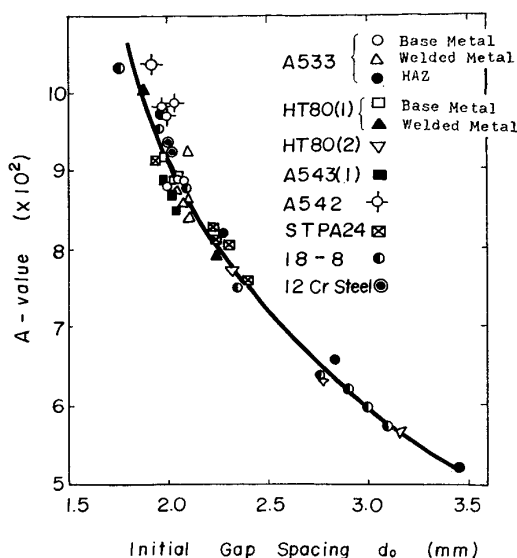


Fig. 9. Unique relationship between the shape constant 'A' and the initial gap spacing.

致する。一方、(b) 図のように引張法での σ_0 - ϵ^i 関係が弾塑性的になると、リング法での初期応力 σ_0^B と引張試験法での $\sigma_0^{B'}$ とが一致しなくなる。特に 18-8 のように RSR の初期応力依存性が大きい場合 (Fig. 4 参照) には、この差は大きくなると考えられる。さらに (c) 図のようにリング法での σ_0 - ϵ^i 関係が弾塑性的になると、実際の初応力が $\sigma_0^{A'}$ であるのに対し^{*1}、RSR を計算する際には σ_0^A を用いるので、RSR を低く見積ることになる。全体的にリング法による RSR が引張法によるそれより低目の傾向があるのは初期応力を $\sigma_0^{A'}$ でなく σ_0^A で評価したためかも知れない。なお、リング試験法での拘束度であるが、(4) 式より ϵ^i (室温) $\equiv (d^i - d_0)/Ad_0$ であり、また ϵ^i (高温) は d^i および d_0 が同じように熱膨張するものとして、やはり ϵ^i (高温) $\equiv (d^i - d_0)/Ad_0$ となる。したがって A が温度により変わらない限り、変温中の拘束はほぼ完全に保たれると考えられる。

形状係数 A は残留応力の絶対値を知りたい場合に、その正確な値を知ることが問題となる。Fig. 9 に示されるように、試験片形状が同じでさえあれば、鋼種に関係なく、 A は切れ目幅 d_0 の一義的関数である。リング法の試験精度を上げるには、初期応力をできるだけ精度よく希望する値に設定することが必要である。初期応力の誤差は、(4) 式より d^i および d_0 の測定誤差が十分小さいことを考慮して、

$$|\Delta\sigma_0/\sigma_0| \cong |\Delta A/A| \dots\dots\dots (6)$$

*1) (2) 式の関係は σ_0 - ϵ^i 関係が弾塑性的になっても成立つことに注意されたい。

で与えられる。もし A の値を Fig. 9 に示す A - d_0 関係より推定し σ_0 を算定すると、その算定誤差は、 $d_0 = 2$ mm, $A = 930$, $\delta A = 55$ とおいて、ほぼ 6% となる。

4.2 RSR の初期応力依存性

本研究では応力緩和過程の比較的初期(短時間側)を扱っており、この場合ひずみ速度はいわゆる時間硬化型の式

$$-1/E^* \cdot d\sigma/dt = k\sigma^n t^m \dots\dots\dots (7)$$

で表わされる⁷⁾。ここで E^* は試験温度でのヤング率、 $k(>0)$, $n(>1)$ および $m(-1 < m < 0)$ は試験温度に依存する材料定数である。(7) 式より次式が得られる。

$$\text{RSR} \equiv \sigma/\sigma_0 = \begin{cases} [1 + E^*k(n-1)t^{m+1}\sigma_0^{n-1}/(m+1)]^{-1/(n-1)} & \dots\dots\dots n > 1 \quad (8)a \\ \exp[-E^*kt^{m+1}/(m+1)] & \dots\dots\dots n = 1 \quad (8)b \end{cases}$$

(8)a 式より、 $n > 1$ の材料では、与えられた t での RSR は σ_0 の増加とともに減少することがわかる。この σ_0 依存性は n , k 等の材料定数の温度依存性によつて変化することが予想される。一般に温度の低い場合は n が大きく k が小さいので、RSR の σ_0 依存性は小さく、温度の高い場合は逆に n が小さく、 k が大きいので、 σ_0 依存性は大きくなるであろう。実際、Fig. 4 をみると、ある温度範囲まではこの関係が認められる。しかしより高温に到ると RSR の σ_0 依存性は再び小さくなつていく。これは一つには材料定数の温度依存性が複雑に変化するためと考えられる。 n が完全に 1 に等しくなると、(8)b 式より、RSR は σ_0 に依存しないことになる。HT80(2) や A543(2) のように組織的に不安定な材料では、試験温度のもとで n がほぼ 1、すなわちひずみ速度が応力にはほぼ比例するような変形挙動をしているものと考えられる。この点は焼入鋼の焼もどし過程での応力緩和の問題⁸⁾とも関連して興味深い。

4.3 変温下の RSR

昇温速度の RSR への影響が、恒温下の試験中の比較的短い時間 (3~4 h) に消失する点については、田中と小幡⁹⁾によつても指摘されている。この点は実際の応力除去焼鈍の際留意すべきことであろう。例えば、焼なまし時間を短縮するには、他の諸条件を考慮した上で、昇温速度を上げればよいという指針が得られる。

固体状態方程式的考察¹⁰⁾に基づけば、580 $\geq$ 550 $^{\circ}$ C の梯形状温度変化を与えた場合、580 $^{\circ}$ C 一定で試験した場合より高い RSR を、また 580 $\geq$ 600 $^{\circ}$ C の変化を与えた場合は、低い RSR を示すことが期待される。しかし、Fig. 7 の結果を見ると、これらの予想は実際と一致しない。これは温度変化に伴う過渡現象の影響¹⁰⁾が大きいこ

とを示唆している。実際、温度を上昇した後、降温する際に、緩和速度が一時的に小さくなる傾向が認められる (Fig. 7)。このような過渡現象は、結果として温度変化の RSR におよぼす影響を小さくすることになる。

5. 結 言

リング試験法を用い、いくつかの実用鋼の応力緩和試験を実施し、以下の諸点を明らかにした。

1) リング試験法により、変温下のデータを含め、満足すべき試験精度をもつて材料の応力緩和データを求められる。残留応力比 RSR (残留応力/初期応力) で比較した場合、通常の引張試験法による結果に対し、リング法による結果は相対誤差 10% 以内で一致する。しかし耐力に比し比較的大きな初期負荷を与えると一致は悪くなり、リング法の RSR は引張法によるそれを大きく下まわる。鋼種によらない形状係数 A と切れ目幅 d_0 との一義的関係を利用して、リング法における初期応力を算定誤差 6% 以内の精度で任意に設定できる。

2) 基準の熱処理を施した A542, HT80, A533B および A543 の 4 鋼種の応力緩和抵抗は、ほぼこの順序で低下する。これら 4 鋼種の RSR の温度、時間依存性は初期応力のある幅にそろえた場合、Larson-Miller のパラメータ ($C=20$) を用いて一義的に整理できる。

3) 初期応力の RSR におよぼす影響は低温側で小さく、高温側で大きくなる傾向があるが、さらに高温にな

ると再び小さくなる傾向が認められる。焼もどしをしない組織的に不安定な材料では、RSR は初期応力にほとんど依存しない。

4) 昇温速度のそれに続く恒温下での RSR への影響は、比較的短時間 (3~4 h) に消失する。580°C を中心に $\pm 25^\circ\text{C}$ の梯形状の温度変化を与えて求めた RSR は、中心温度の恒温下で求めた RSR とほとんど変わらない。

文 献

- 1) JIS Z 2276 (1975) “金属材料の引張リラクセーション試験方法”
- 2) J. C. RITTER and R. McPHERSON: JISI, 208 (1970), p. 935
- 3) И. Я. ОДИНГ: Вестник Машиностроения XXVI (1946), p. 1
- 4) I. A. ODING: “Creep and Stress Relaxation in Metals” (English Ed.), (1965), p. 265 [Oliuer & Boyd]
- 5) R. L. BROWN and M. COHEN: Metal Prog. (1959), Feb., p. 66
- 6) 篠田哲守, 島貫 静, 佐々木良一: 材料, 20 (1971), p. 7
- 7) 例えば J. H. GITTUS: Phil. Mag., 2 (1964), p. 7
- 8) S. V. GRACHEV and V. YA. ZUBOV: Phys. Metals Metallog. 15 (1963), 6, p. 47
- 9) 田中甚吉, 小幡忠良: 溶接学会誌, 36 (1967), p. 222
- 10) 平 修二, 機械の研究, 11 (1959), p. 1321