急熱急冷後、丸鋼の加熱中央断面に生ずる残留応力分布[†] ——環状切欠き試料の計算結果と切断実験におけるき裂長さ——

加 藤 昌 彦* 青 山 威 恒*

Residual Stress Distribution in Notched Section of High Carbon Chromium Steel Specimens Caused by Rapid Heating and Cooling

by

Masahiko KATO^H* and Shigetsune AOYAMA*

In the previous paper, the authors' method for breaking high carbon steel rod into billets was introduced, in which a cross-sectional crack was developed from a slight sharp peripheral notch of the rod by rapid local heating and cooling. Furthermore, the hardness and residual stress distributions of unnotched specimens of high carbon chromium steel (SUJ 2) were measured after they were subjected to local treatment under various heating and cooling conditions including optimum ones for breaking notched rods.

In the present study, the residual stress distribution in the notched section of SUJ 2 specimens caused by local rapid heating and cooling was evaluated by FEM calculations based on the assumption that the heat-treated state is substantially the same between the unnotched and notched specimens. First, the measured residual stress distribution in the unnotched specimen was reproduced in the unnotched FEM model in which local initial strain distribution was properly given. Secondly, the same local initial strain distribution was applied to the FEM model having a notch or crack extending from the notch root.

The crack lengths developed in the actual rod breaking tests were discussed in relation to the residual stress distribution calculated using the notched FEM model as well as the mechanical properties of rods.

The results obtained are as follows.

(1) The distribution of axial residual stress measured in the unnotched specimen was satisfactorily reproduced by giving a reasonable local initial strain distribution to FEM model.

(2) The calculated residual tensile stress in the axial direction near the notch root was relatively higher and more deeply distributed under conditions causing cracks than under those not causing cracks.

(3) The breaking tests of SUJ 2 rods showed that cracks propagated to the depth where the calculated axial stress at 0.1 mm depth from crack tip (σ_{eff}) comes down to a value nearly equal to the net breaking strength of the rods (σ_b).

キー・ワード：鋼材切断，軸受鋼，急熱急冷，残留応力，き裂

1 ま え が き

われわれは、硬質棒鋼を圧延のまま正しく切断するため、まず、棒鋼の切断位置に浅く鋭い環状切欠きをつけ、つぎに、局所的な急熱急冷により切欠き底に沿う深いき裂を生じさせ、その後機械的に破断する方法を開発した。^{1,2)}

本方法におけるき裂の発生と進展は、鋼材表面を急熱急冷する間に、切欠き底に生ずる軸方向の引張残留応力によっている。き裂発生の方法には、「1 回法」と「反復法」がある。「1 回法」では1回の急熱急冷

操作で、また、「反復法」では相異なる条件の急熱急冷操作を連続して加えて、き裂を生じさせる。

前報では、切欠き底にき裂が発生する条件およびその周辺条件で、軸受鋼の切欠きなし丸棒試料を高周波加熱、水冷却したとき、加熱中央断面に発生する残留応力の分布を実測し、各条件時の残留応力発生機構につき考察を加えた。

本報では、まず、前報で述べた切欠きなし試料の加熱中央断面における残留応力分布を、簡便な有限要素法 (FEM) 弾性計算により再現することを試みた。切

[†] 本報を「急速加熱、冷却による硬質鋼の切断に関する研究 (第2報)」(Study on the Breaking Method of High Carbon Steel Rod, II) とする。

原稿受理 昭和60年3月19日 Received Mar. 19, 1985

* 正 会 員 (株)豊田中央研究所 愛知県愛知郡長久手町, Toyota Central Research and Development Laboratories, Nagakute-cho, Aichi-gun, Aichi

欠きなし FEM モデルには、前報で考察した応力発生機構から定性的に妥当と思われる初期ひずみ分布を与える。つぎに、加熱冷却部の全体的な初期ひずみ分布は、浅く鋭い環状切欠きの有無により大きく変わらないと仮定し、上記の初期ひずみ分布を切欠きつきモデルに与え、環状切欠きをもつ試料の加熱中央(切欠き底)断面における残留応力分布を試算する。このばあい、切欠き底にき裂が発生する条件に対しては、切欠き底からのき裂長さを変え、き裂底断面の残留応力分布を試算し、計算結果と切断実験時実測したき裂長さとの関連を検討する。

2 加熱冷却条件と、加熱冷却状況に及ぼす切欠きの影響

2.1 加熱冷却条件

検討の対象とした加熱冷却条件を、まとめて Table I に示す。これらは前報の実験時と同じで、深さ 1.5 mm, 60°V, 底半径 0.25 mm の環状切欠きをつけた高炭素クロム軸受鋼 (SUJ 2, 圧延のまま) 試料を、真空管式高周波焼入れ装置 (周波数 20 kHz, 公称出力 85 kVA) により加熱、水冷却するとき、切欠き底に深いき裂が発生する条件を中心に選んだ。加熱用コイルは、表に示す内径と幅をもつ、厚さ 10 mm の円筒形一回巻コイルで、内面にピッチ 5 mm で三段に配置した直径 1 mm の冷却水孔が設けてある。

Table I の条件番号 1～3 は、「1 回法」(t_h 時間加熱後、水冷却) 検討の条件である。番号 2 は、直径 55 mm 試料におけるき裂発生条件 (組織変化なし)、番号 1 および 3 は、き裂発生条件より加熱が弱すぎ、または強すぎ (焼入れ組織となる) て、き裂が発生しないばあいである。

条件番号 4～7 は、「反復法」(t_1 時間加熱後、水冷却、続いて t_2 時間加熱後、水冷却) を検討する条件である。番号 6 および 7 は、それぞれ、直径 38 および

55 mm 試料にき裂を発生させる条件 (試料表面は焼入れされ、続いて焼もどしされる)、また番号 4 および 5 は、番号 6 の 1 回目 (焼入れ) および 2 回目 (焼もどし) の条件である。

2.2 切欠きの有無と加熱冷却状況

Fig. 1 (a) には、条件番号 4, 5 および 6 の操作を加えた、直径 38 mm 切欠きなしおよび切欠きつき試料の、たてわり断面上で測定した半径方向の硬さ分布を示す。点線は切欠きなし試料、実線は切欠きつき試料の結果で、分布曲線の番号は条件番号を示す。条件番号 4 および 6 のばあい、組織が変化し、硬さが増加した層の厚さは約 0.8 mm で、切欠き底には達していない。硬さが増加した層の厚さは、切欠きつき試料の方がわずかに厚い。

Fig. 1 (b) には、条件番号 7 の加熱冷却操作を加えた直径 55 mm 試料の、たてわり断面上における硬さ分布を二次元表示で示した。1 回目の加熱冷却操作で焼入れ硬化した層の表面部が、2 回目の操作により焼もどしされている。切欠きつき試料の硬化層厚さは、切欠き近辺で切欠きなしのばあいより若干厚く、切欠き深さ以上に達している。しかし、切欠き底では硬さは変化せず、組織変化も見られない。

一般に、切欠き部のような断面急変部をもつ鋼の表面を円筒形コイルにより高周波加熱すると、誘導電流は尖頭効果により切欠き肩部に集中し、切欠き底には流れにくい。そのため、切欠き肩部が他の部分より若干強く加熱される。しかし、切欠き部分は加熱帯域全体から見れば、比較的狭い範囲である。したがって、本報では、「加熱冷却を受ける帯域の全体的な状況は、切欠きの有無によりあまり変化しない」という仮定のもとに検討を進める。

3 残留応力計算方法

加熱冷却を受ける試料の中央断面における残留応力

Table I. Heating and cooling conditions of rods.

	Condition No.	Specimen diameter (mm)	Heating condition						Cooling condition	
			Inductor		Power of heater (kVA)	Heating time t_h or t_1 and t_2 (sec)			Water volume (l/sec)	Cooling time (sec)
			Inner diameter (mm)	Width (mm)		t_h	t_1	t_2		
Single heating process	1	55	61	30	94	3.0	—	—	1	20
	2*	55	61	30	94	4.5	—	—	1	20
	3	55	61	30	94	5.0	—	—	1	20
Double heating process	4	38	43	30	91	—	3.0	—	0.7	20
	5	38	43	30	91	—	2.0	—	0.7	20
	6*	38	43	30	91	—	3.0	2.0	0.7	20
	7*	55	61	30	87	—	6.0	3.0	1	20

* Condition causing sufficiently deep crack

Fig. 1. Comparison in hardness distribution between notched and unnotched rods.

Fig. 2. Finite element mesh of unnotched and notched models.

分布は、三次元等方の初期ひずみをモデルの加熱冷却部中の要素に与え、各要素の応力を計算する方法により求める。

Fig. 2 には、直径 38 mm 試料の計算モデルの要素

分割図〔たてわり 1/4 断面、(i)切欠きなし、(ii)切欠きつき〕を示した。直径 55 mm 試料の計算モデルも、Fig. 2 とほぼ同寸法の要素で、同様の形態に分割した。なお、計算における弾性係数およびポアソン比は、それぞれ、 $2.1 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2$ 、0.32 とした。これは、直径 55 mm の SUJ 2 試料から切り出した JIS 4 号引張試験片による実測値である。

3・1 切欠きなし試料

まず、切欠きなし試料の加熱中央断面で実測した軸方向の残留応力分布を、切欠きなしモデルによる FEM 計算で再現することを試みる。加熱冷却時、試料に生ずる熱ひずみは、実際には、軸方向にも半径方向にも変化する。しかし、計算の対象は加熱中央断面上の残留応力分布であるから、計算モデルに与える初期ひずみは、試料軸方向には一定とし、また、初期ひずみを与える範囲は、直径 38、55 mm いずれのばあいにも、モデル中央の幅 20 mm (中央断面から試料軸方向に 10 mm) の範囲とした。これは、前記の加熱用コイルを用いて高周波加熱するときの試料赤熱状態、加熱後の硬さ分布等を参考に決定した。一方、半径方向には実測応力の分布とその発生機構を考慮して、初期ひずみの分布形を定め、加熱中央断面軸方向応力の計算結果が実測値と一致するように細部を修正する。

3・2 切欠きつき試料

つぎに、切欠きつき試料の加熱中央断面(切欠き底断面)の軸方向残留応力分布を、切欠きつき計算モデルを用いた同様の計算により試算する。すなわち、切欠きなしモデルに対する計算で、加熱中央断面の実測残留応力分布を再現した初期ひずみ分布を、2・2 節で述べた仮定のもとに切欠きつきモデルの対応要素に与え、切欠き底断面の応力分布を計算する。切欠きつき試料に、切断に適する加熱冷却操作を施すときは、完冷以前に切欠き底にき裂が発生、進展するが、その状態における応力分布は、中央断面の要素支持を切欠き底から順次開放することにより計算する。

Fig. 3. Finite element mesh of notch root model.

Fig. 4. Finite element mesh of crack tip model.

なお、切欠き底付近ならびにき裂底付近の応力を、より詳しく計算するため、ズーム計算も試みた。ズーム計算では、Fig. 2 に斜線で示す範囲の細分割モデルを作り、これに境界変位を与える。Fig. 3 および 4 には、それぞれ、切欠き底およびき裂底付近の細分割モデルを示す。

4 残留応力計算結果

4.1 切欠きなし試料

前報で述べたように、各条件番号の操作により加熱中央断面に生ずる残留応力の分布は、次の三つの形に分類することができる。

第1の形は、組織変化をともしなない熱残留応力の分布である。加熱中の温度差に起因する表面付近の塑性縮みのため、冷却後は表面で引張り、内部で圧縮の応力を示す。条件番号1, 2 (1 回法) および 5 (反復法の 2 回目単独) の操作による残留応力はこの形であり、表面から内部に向けて漸減する縮みの初期ひずみを与えることにより再現する。

第2の形は、表面に焼入硬化層が形成されたときの残留応力分布である。条件番号3 (1 回法) および 4 (反復法の 1 回目単独) の操作による残留応力分布はこの形で、第1の形の熱残留応力分布に対応する初期ひずみ分布に、表面付近のマartenサイト変態に相当する伸びひずみを重畳させて再現する。

第3の形は、「反復法」による残留応力分布である。1 回目の加熱冷却操作で形成された焼入硬化層が、2 回目の操作で適度に焼もどしされたときに得られる。2 回目の操作により表面付近のマartenサイト変態ひずみが除去され、焼もどし層には1回目の加熱冷却時の塑性縮みに見合う引張応力を生ずる。このばあい、1 回目の加熱時の表面温度が高く、また、焼もどし層は焼入れ前よりも降伏点が高いため、表面の引張応力値は著しく高くなる。条件番号6 および 7 の残留応力分布はこの形で、第1の残留応力分布形を再現した初期ひずみ分布の、焼もどし層に相当する範囲に、大きな縮みのひずみを重畳させることにより再現する。

Fig. 5 (a) および (b) には、き裂発生条件である条件番号 2 (1 回法) および 6 (反復法) のばあいにつき、

(a) Condition No. 2.

(b) Condition No. 6.

Fig. 5. Calculated residual stress and given initial strain distribution in unnotched FEM model.

計算で再現した加熱中央断面の残留応力分布 (曲線) を実測値 (プロット) と比較して例示する。図には、残留応力分布再現のため計算モデルに与えた初期ひずみの半径方向分布も図示した。

Fig. 5 (a) の残留応力分布は、上記第1の応力分布形であり、Fig. 5 (b) の残留応力分布は第3の応力分布形に相当する。いずれのばあいにも、軸方向残留応力計算値は実測値によく追従している。一方、円周方向残留応力の計算値は、実測値と分布形はよく似ているが多少の差がある。

4.2 切欠きつき試料

各加熱冷却条件ごとに、切欠きなしモデルに与えた初期ひずみ分布を、切欠きつきモデルに与え、切欠き底断面における軸方向残留応力分布を試算した。

Fig. 6 (a) には、1 回法検討の条件 (条件番号 1~3)、Fig. 6 (b) には、反復法検討の条件 (条件番号 4~7) につき計算した切欠き底断面 (切欠き底直下、半径方向) の残留応力分布を示す。図中の曲線番号は、それぞれ、条件番号に対応する。なお、条件番号 2, 6 および 7 のとき、切欠き試料では冷却中にき裂が発生するが、完全冷までき裂が発生しないとして計算した。

条件番号 1, 2 の応力分布形はよく似ているが、き裂発生条件 (曲線 2) の方が切欠き底の引張応力値も

(a) Condition Nos. 1~3.

(b) Condition Nos. 4~7.

Fig. 6. Residual axial stress distribution near notch root calculated on the notched section of FEM model.

切欠き底下部における引張応力のレベルも高く、き裂の発生と対応している。条件番号3（曲線3）は、試料表面に焼入れ硬化層が形成される条件の結果である。硬化層は切欠き底まで達していないが、切欠き底付近の計算応力は圧縮になっている。

条件番号6, 7につき計算した結果（曲線6および7）は、曲線2とよく似た応力分布である。しかし、切欠き底付近の引張応力値は、1回法のき裂発生条件（曲線2）に比べても著しく高い。また、条件番号6の1回目、2回目の操作である条件番号4, 5の計算結果は、それぞれ、曲線4, 5のようになった。

つぎに、き裂発生条件である条件番号2（1回法）、6および7（反復法）のばあいにつき、切欠き底にき裂が生じ、ある長さまで進展したとして、切欠き底からのき裂長さを変えてき裂底断面上（半径方向）における軸方向残留応力分布を試算した。それぞれの計算結果を、Fig. 7 (a), (b)および(c)に示す。き裂底付近の

応力値は、いずれの条件のばあいにも、き裂長さの増加とともに一旦増加したのち、減少する傾向を示す。このことは、切断実験においてき裂の発生、進展が安定していることと対応する。また、切欠き底応力およびき裂底応力の最大値を直径 55 mm モデルについてみると、「1回法」のき裂発生条件（番号2）より、「反復法」のき裂条件の方が大きくなっている。「反復法」についてみると、モデル直径の大きい番号7の方が、直径の小さい番号6のときより応力は大きい。こ

(a) Condition No. 2.

(b) Condition No. 6.

(c) Condition No. 7.

Fig. 7. Residual axial stress distribution near crack tips calculated in relation to the crack length from notch root.

れらは、切断実験において「1 回法」よりも「反復法」、直径の小さい試料より大きい試料の方が、き裂発生条件範囲が広く、き裂長さが長いことと対応している。

5 考 察

き裂発生条件に対し、き裂の長さを変えて計算したき裂底断面の残留応力分布を、切断実験時実測したき裂長さと比較し、引張試験による母材の破断強度を参照して、両者の関連を調査する。

Table II および III には、切断実験に使用した直径 38 および 55 mm の SUJ 2 (圧延のまま) 試料母材の化学成分と、それらの表面付近から採取した JIS 4 号引張試験片 (φ55 mm 母材), JIS 4 号相似試験片 (φ38 mm 母材) により求めた機械的性質を示す。母材の破断伸び ϕ は 6.6~6.8% で、絞りほとんどみられず、破断面は試験片軸にほぼ直角で、比較的平坦であった。

Table II. Range of crack length from notch root measured on notched rods.

Diameter (mm)	C	Si	Mn	Cr	P	S
38	0.97	0.25	0.31	1.42	0.013	0.011
55	0.98	0.25	0.38	1.37	0.011	0.014

Table III. Chemical compositions of high carbon chromium bearing steel rods (%).

Diameter (mm)	Hardness $H_V(10\text{kg})$	Yield Strength $\sigma_{0.2}$ (kg/mm ²)	Tensile strength σ_B (kg/mm ²)	Breaking strength on final area σ_T (kg/mm ²)	Elongation ϕ (%)
38	347	71.3	123	132	6.6
55	343	66.2	118	127	6.8

一方、切断実験において、切欠きつき試料に条件番号 2 (φ55 mm 試料, 1 回法), 6 および 7 (φ38 および 55 mm 試料, 反復法) の加熱冷却操作を加えき裂を発生させたのち、片持ち曲げ破断させた面上で実測したき裂長さをまとめて Table IV に示す。き裂の発生、進展はいずれの条件のばあいも安定していたが、「反復法」の方が「1 回法」よりき裂長さの平均値は長く、ばつらき範囲も狭いようである。

Table IV. Mechanical properties of high carbon chromium bearing steel rods (as rolled).

	Condition No.	Specimen diameter (mm)	Crack length from notch root (mm)
Single heating process	2	55	3.6~6.0
Double heating process	6	38	3.0~4.0
	7	55	4.5~6.0

なお、Fig. 8 には、参考のため、条件番号 6 のばあいにつき、片持ち曲げ破断片のたてわり断面で観察したき裂を例示した。

つぎに、Table IV に示した実測き裂長さを Fig. 7 の各図の横軸上に示すと、斜線を施した範囲となる。実験におけるき裂の停止位置は、き裂長さの増加により計算応力が減少する領域にある。一方、き裂は、おもに軸方向残留応力によって発生、進展すると考えられるが、母材の破断強度として真破断力 σ_T をとってこれらの図の縦軸上に記入すると、一点鎖線のようになる。

さて、き裂底付近の軸方向計算応力は全ひずみを弾性ひずみとみなした見かけ応力であり、急激なこう配を示しているから、き裂の発生、進展はき裂底の最大応力ではなく、き裂底からある深さ $4t$ 位置の実効応

Fig. 8. The example of crack produced by the operation of condition No. 6 observed on the axial section of broken rod.

力 σ_{eff} によって起ると考えてよさそうである。これは、鋭い切欠きをもつ試験片に疲労き裂が生ずるとき、切欠き底の最大応力ではなく、ある深さにおける σ_{eff} による^{5,6)}と考えると取り扱うのと同様である。

いま、Fig. 7 の各図において、き裂底から深さ $4l = 0.1 \text{ mm}$ の位置の軸方向応力を破断に対する実効応力と考え、き裂長さに対して図示すると破線のようになる。切断実験によるき裂長さの範囲(斜線部)では σ_{eff} (破線)は、各母材の真破断力 σ_T (一点鎖線)とほぼ等しいレベルにあることがわかる。すなわち、「1 回法」と「反復法」、あるいは試料直径の差にかかわらず、試料に発生するき裂の長さは、上記き裂底断面の軸方向計算応力の、き裂底から深さ 0.1 mm の位置における値 σ_{eff} と母材の真破断力 σ_T とから予測することができる。

6 ま と め

切欠きなし試料の加熱中央断面における実測残留応力分布をより所として、同条件の加熱冷却を施した切欠きつき試料の加熱中央(切欠き底)断面に生ずる残留応力の分布を、FEM により計算した。このばあい、切欠き底にき裂が生ずる加熱冷却条件のばあいには、き裂長さを変えてき裂底断面の応力分布も計算し、切断実験における実測き裂長さとの関連を求めた。

結果をまとめると以下ようになる。

(1) 半径方向には変化するが、軸方向には一定の三次元等方初期ひずみを、切欠きなしモデルの加熱部対応範囲に与えることにより、切欠きなし試料で実測した加熱中央断面における軸方向残留応力分布を再現することができた。このばあい、円周方向残留応力の計算値は、実測値と分布形はよく似ているが、多少の差があった。

(2) 切欠きつきモデルに上記の初期ひずみ分布を与

えて、切欠き底断面における残留応力分布を計算した。切欠き底付近の軸方向引張応力は、き裂発生条件のばあいに、き裂が発生しない条件のときより大きく、作用深さも深かった。また、き裂が発生する条件間の比較では、軸方向引張応力は、「反復法」の方が「1 回法」より大きくなった。

(3) き裂長さを変えて計算したき裂底付近の軸方向引張応力は、「1 回法」、「反復法」いずれのばあいも、き裂長さの増加とともに一旦増加したのち、低下する。これは、切断実験におけるき裂の発生、進展状況が安定していることに対応している。

(4) 切断実験時、切欠きつき試料に発生したき裂は、「1 回法」、「反復法」、あるいは試料直径の相違にかかわらず、き裂底から深さ 0.1 mm の位置における軸方向の計算応力が、母材の真破断力にほぼ等しくなる深さまで進展していた。

(昭和52年5月24日 日本材料学会第26期学術講演会；昭和52年7月21日 第14回材料強度に関するシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) “鋼材切断法”，日本特許：970416，米国特許：3958732，西独特許2461095，スウェーデン特許：7415896-5。
- 2) 加藤昌彦，青山威恒，古田 修，材料，**33**，628 (1984)。
- 3) 例えば，The ASM Committee on Induction Hardening, "Induction Hardening and Tempering", p. 146 (1964) Chapman and Hall, Limited London.
- 4) ツェンキヴィッツ，“基礎工学におけるマトリックス有限要素法”，p. 83 (1975) 培風館。
- 5) 青山威恒，Review of Toyota RD Center, Vol. 5, No. 2, 1 (1968)。
- 6) 石橋 正，“金属の疲労と破壊の防止”，p. 57 (1967) 養賢堂。