

鑄鋼の疲れ強さに及ぼす鑄肌の影響

Effect of Casting Surface on the Fatigue Strength of Cast Steel

吉 武 博 之*
Hiroyuki Yoshitake

内 容 梗 概

鋼材の黒皮付近には応力集中源や脱炭層が存在するため、その強度特に疲れ強さははなはだしく低い。したがって大きな力を受ける機械部品を黒皮のまま使用することは強度上好ましくない。しかし表面を仕上げないまま使用したほうが加工の手数が省けて経済上有利な場合がある。本研究ではニッケルクロムマンガン鑄鋼の鑄肌が疲れ強さにいかなる影響を与えるかを調べた。

その結果鑄肌のままの試験片は機械仕上げしたものより約30%程度疲れ限度が低下することがわかった。

また疲れ強さを上げる目的で高周波焼入れを施したものについても実験した。その結果鑄肌のままのものは多少疲れ限度が上がったが、機械仕上げしたものには磁気探傷で発見できるきれつがないにもかかわらず疲れ限度が低下した。

1. 緒 言

鋼材の黒皮付近には応力集中源や脱炭層が存在するためその強度特に疲れ強さが低い。したがって大きな力を受ける機械部品を黒皮のまま使用することは強度上好ましくない。しかし多少寸法を大きくしても表面を仕上げないまま使用したほうが、加工の手数が省けて経済上有利な場合がある。本研究は SCMNC 70 (ニッケルクロムマンガン鑄鋼) の鑄肌が回転曲げ強さに及ぼす影響を調べた。また鑄肌によって低下しているものの強度を上げる目的で、高周波焼入れを施した試験片の疲れ試験もあわせて行った。

2. 試 験 片

供試材料は第1表に示すような化学成分、機械的性質をもったニッケルクロムマンガン鑄鋼で、試験片はすべて加工前に拡散焼鈍および調質(焼入焼戻)処理を行った。引張試験片は第1図に示したような舟形試験片を鑄込んで下部から JIS 4号試験片を採取して行った。表面を機械仕上げする疲れ試験片は直径30mm長さ300mmの丸棒に、鑄肌のままの試験片は試験部分の仕上がり寸法が17mmφになるよう鑄込んだ。どちらもひけが生じないよう十分な押湯をつけた。切欠疲れ試験片は第2図に示すような形状係数αが1.63と1.40のものについて行った。試験片の鑄込みはすべて同じ湯を用いて同時に行いたかったが、高周波溶解炉の容量が不足したので二つに分けて鑄込みA材、B材と名付けた。

A材では平滑試験片および形状係数1.63の切欠試験片の調質および高周波焼入れをしたものを実験した。また高周波焼入れ部と焼入れられない部分との境界の強さが低下しないかどうかを確認するために、平滑試験片の中央部10mmの幅のみに高周波焼入れを行って焼入れ境界層を作り実験した。

B材では平滑試験片および形状係数1.40の切欠試験片の調質したものについて実験した。

高周波焼入れは周波数10,000サイクルのシヨッペ式焼入れ装置を使用し、焼入れ深さはすべて3mmを目標とした。しかし鑄肌材は硬度が上りにくいので多少深くして硬度を上げるようにした。平滑材の全面を一時に高周波焼入れできなかったため第3図に示すように、まず加熱コイルが試験片を加熱しながら移動しそのすぐあとを冷水噴射コイルが続き、試験片の加熱された部分を冷却してゆくいゆる連続焼入れ方式を採用した。

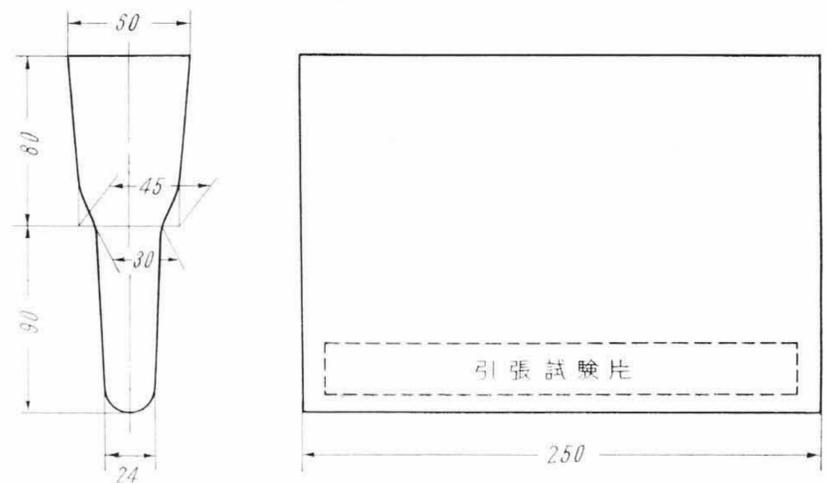
高周波焼入れした試験片のマクロエッチ写真を第4図に焼入れ組織お

* 日立製作所亀有工場

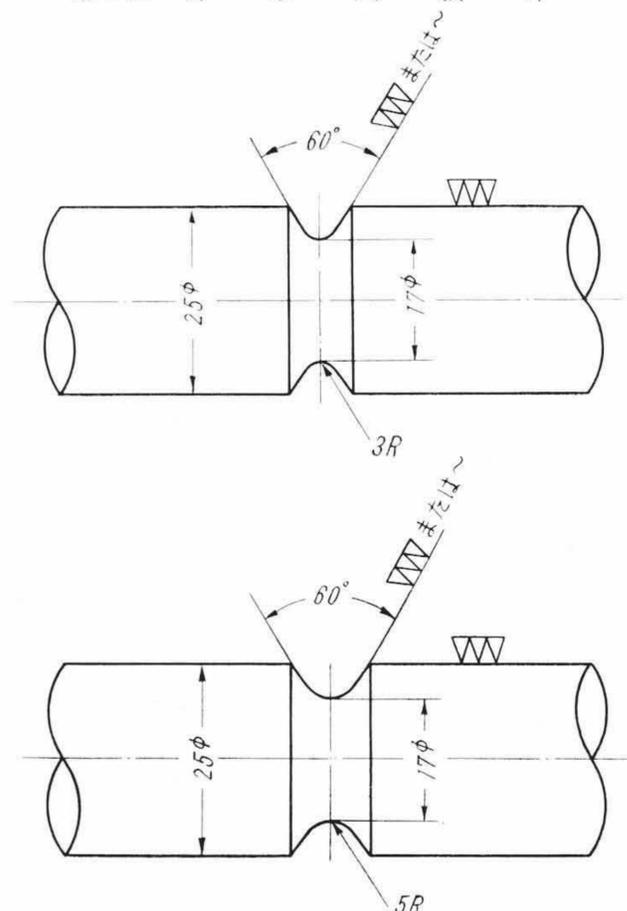
第1表 化学成分と機械的性質

	化 学 成 分							機 械 的 性 質				
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	σ_B	$\sigma_{0.02}$	σ_T	φ	ψ
A材	0.28	0.54	1.37	0.021	0.016	0.85	0.98	74	37.9	88.6	20.3	30.1
B材	0.28	0.38	1.20	0.018	0.017	0.93	1.12	71	38.6	98.2	23.8	39.7

σ_B : 抗張力 kg/mm² $\sigma_{0.02}$: 0.2% 耐力 σ_T : 真破断力 kg/mm²
 φ : 伸び率 % ψ : 断面収縮率 %

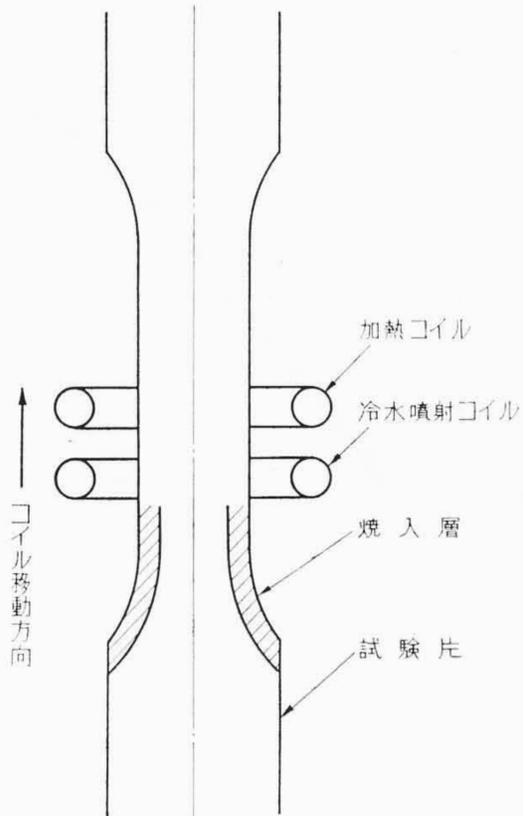


第1図 舟形試験片

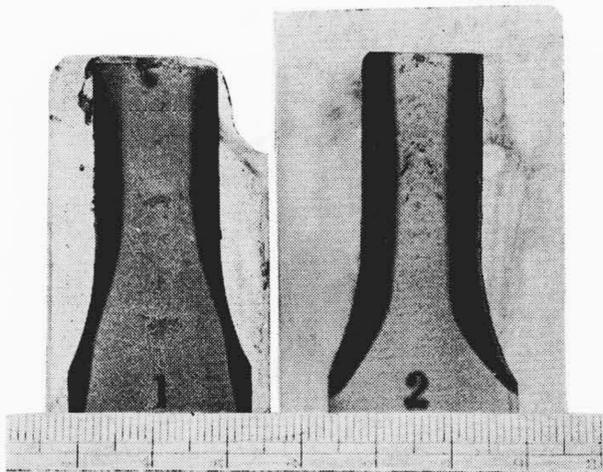


3 R $\alpha=1.63$
5 R $\alpha=1.40$

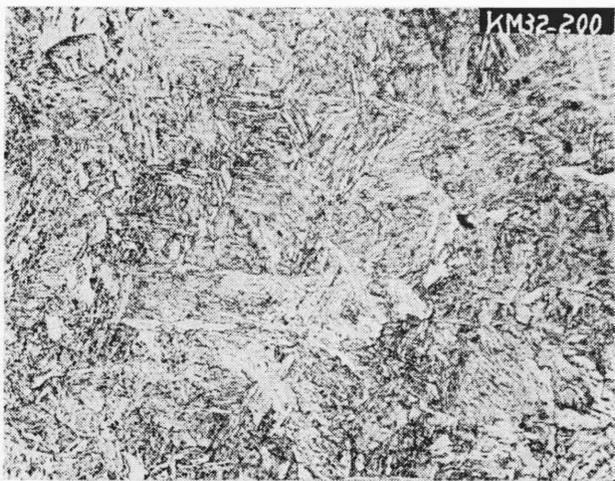
第2図 切欠試験片の寸法



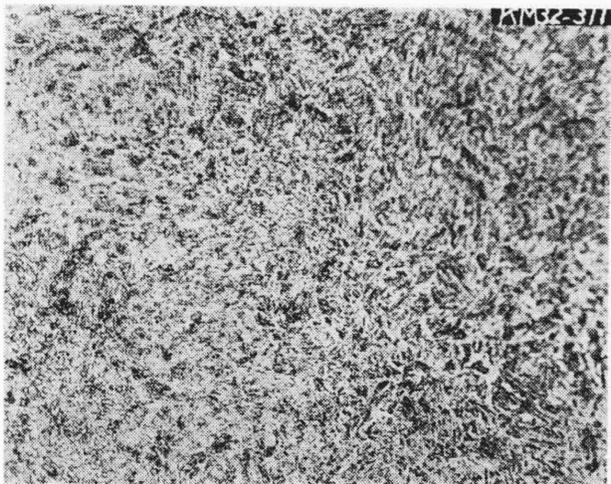
第3図 連続焼入れ方式の説明図



第4図 高周波焼入れのマクロ写真

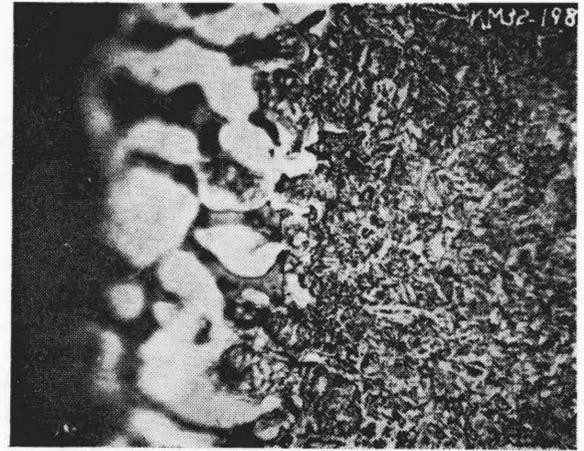


(a) 調質組織

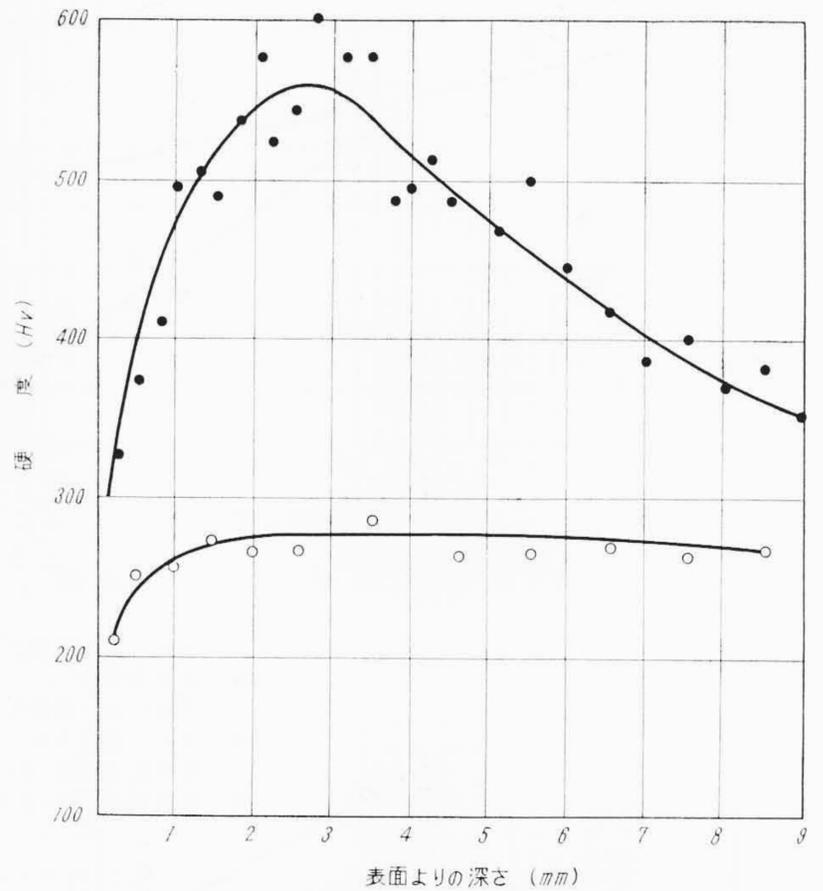


(b) 焼入組織

第5図 試験片の組織 (×400)



第6図 鋳肌表面の脱炭層 (×400)



第7図 鋳肌試験片の硬度分布

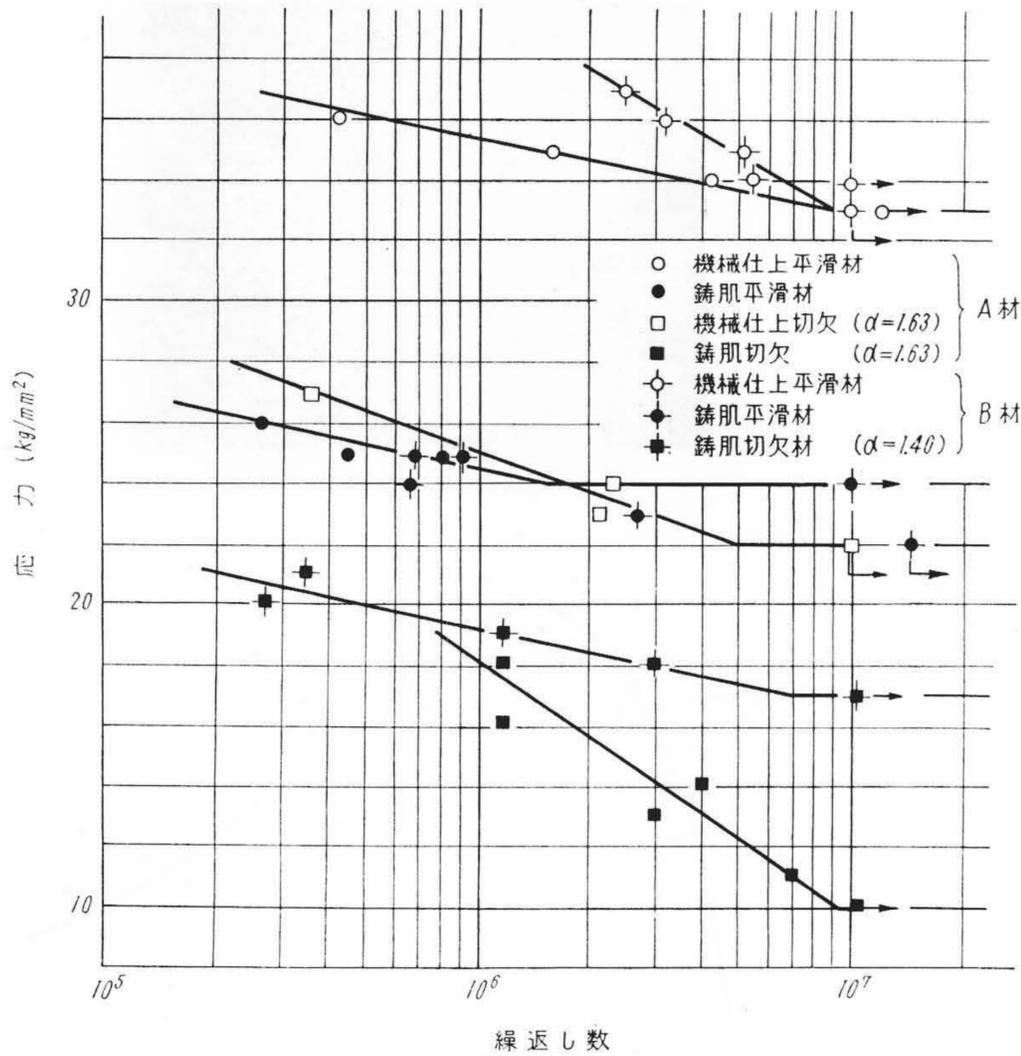
第2表 疲れ試験の結果

材料	形状	熱処理	鋳肌のまま (kg/mm ²)	機械仕上 (kg/mm ²)
A	平滑	調質	24	33
	平滑	高周波焼入	30	27 (以上)
	平滑	一部高周波焼入	24	27
	切欠 (α=1.63)	調質	10	22
	切欠 (α=1.63)	高周波焼入	28	不明
B	平滑	調質	22	33
	切欠 (α=1.40)	調質	17	—

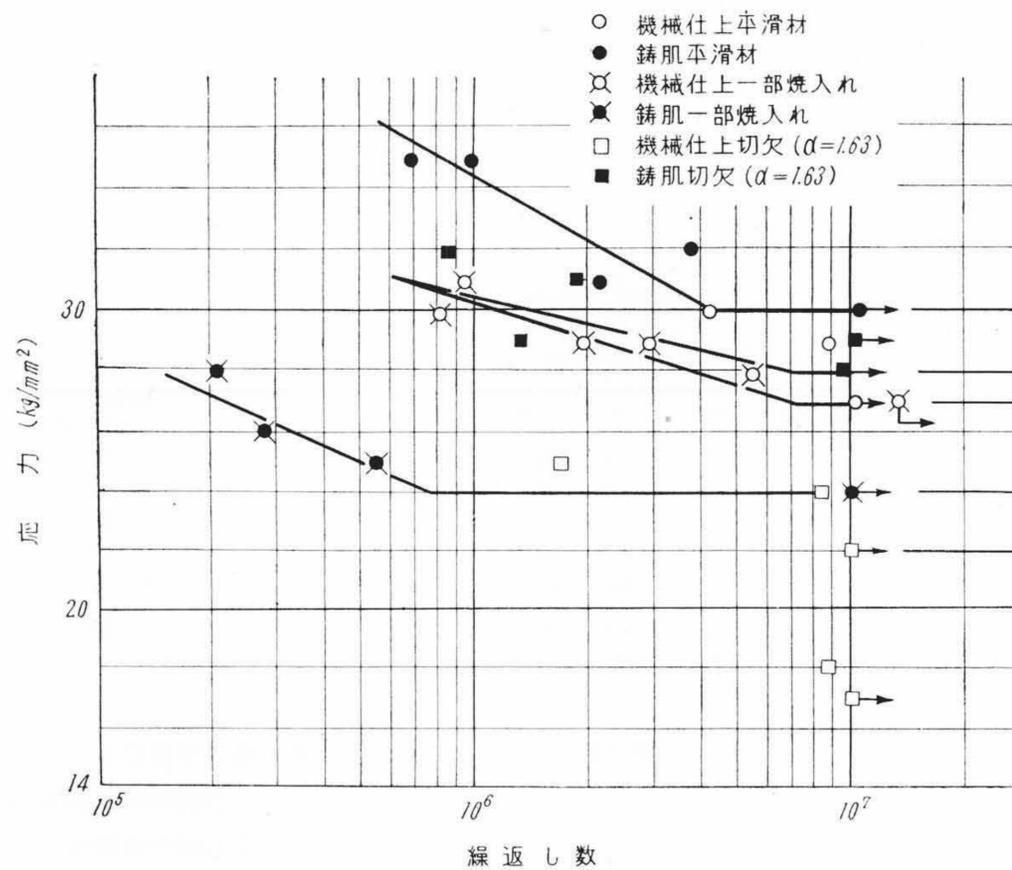
よび調質組織を第5図に示す。焼入深さは第4図の写真のようになり一様な深さにすることができた。鋳肌試験片の表面には第6図のように著しい脱炭層が見られる。表面より半径方向の硬度分布の一例を示せば第7図のようになる。鋳肌試験片は図のように表面より1mmくらいまで硬度が低いから恐らく熱処理中に脱炭したものである。

3. 疲れ試験

疲れ試験は45kg-mの小野式回転曲げ試験機(1,450rpm)を使用して実験した。鋳肌のままの試験片は断面が必ずしも完全な円形とならず多少楕円形をしており、また凹凸などがあるため断面係数のとり方に問題がある。本実験では断面の互に直交せる二つの直径の相加平均を直径とする円の断面係数を採用した。いまかりに断面が長径 d_1 短径 d_2 なる楕円であるときその断面係数は $\frac{\pi}{32}d_1d_2^2$ である。本実験の場合のようにこの断面を $(d_1+d_2)/2$ を直径とする円



第8図 調質試験片の S-N 曲線



第9図 高周波焼入れ試験片の S-N 曲線

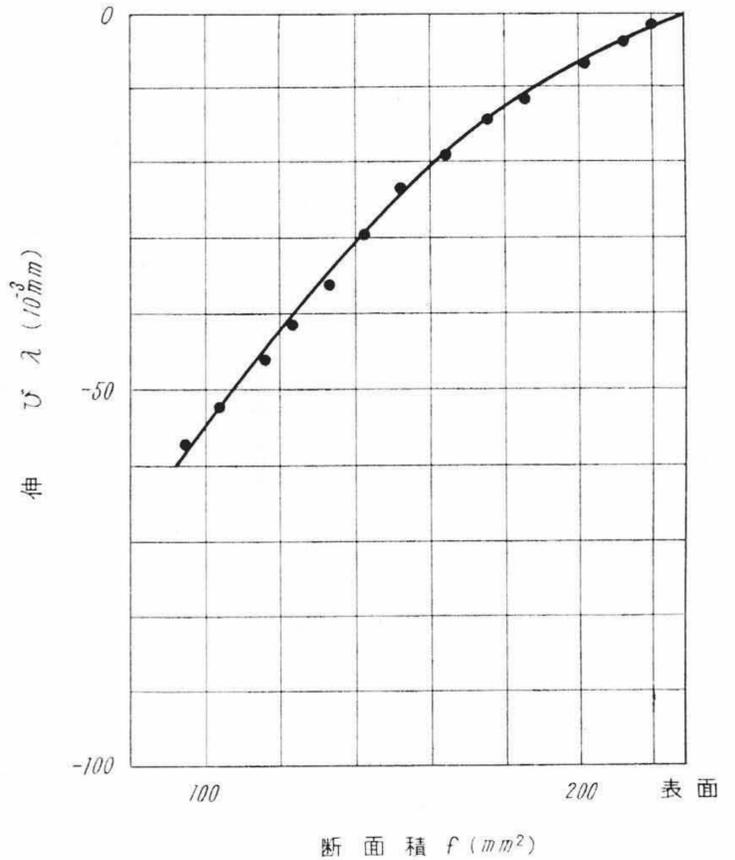
と考えればその断面係数は

$$\frac{\pi}{32} \frac{(d_1 + d_2)^3}{8}$$

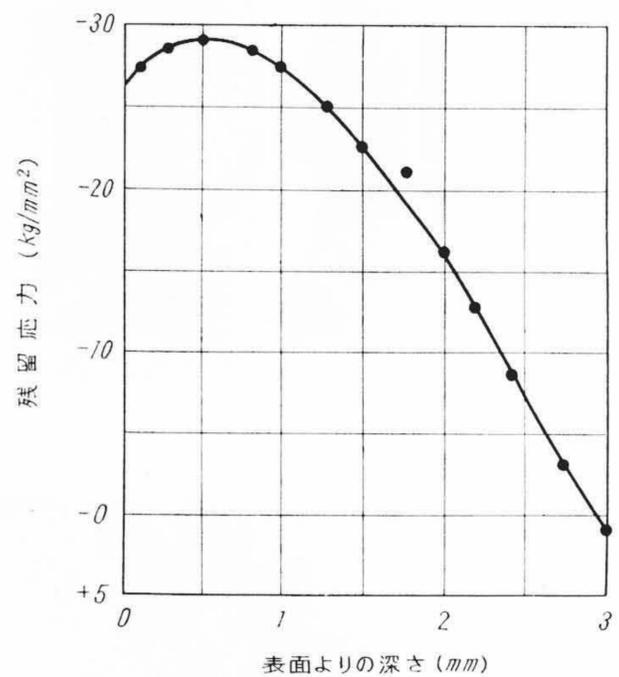
であるからその相対誤差は $(d_1 - d_2) / (d_1 + d_2)$ となる。

本実験に用いた試験片は $d \approx 17\text{mm}\phi$ であり $(d_1 - d_2)$ の最も大きな試験片で 0.5mm に過ぎなかったから誤差は 1.5% をこえない。この誤差は実験の精度より考えて許容できる。

実験の結果疲れ限度および S-N 曲線を示せば第2表および第8, 9図のようになる。一般に高周波焼入れを施したものはばらつきが多いが、表面を機械仕上げした切欠試験片の高周波焼入れしたものはば



第10図 断面積と伸びとの関係



第11図 残留応力の分布

らつきが特に多く疲れ限度が求まらなかった。

4. 残留応力の測定

高周波焼入れによって材料の疲労限度が上るのは焼入れによって材質的に向上することと、表面に大きな圧縮の残留応力を生ずるためである。しかし表面に引張の残留応力を生じている場合は逆に疲れ限度が低下することがある。本実験では表面を機械加工したものに高周波焼入れを行うと疲れ限度が低下したので、表面に引張の残留応力を生じている恐れがないかを調べるため測定した。

回転曲げ疲れ強さに最も関係深いのは長さ方向の残留応力であるから、長さ方向の残留応力を Heyn の方法で求めた。

試験片の両端面の中心に直径 2mm の小さい鋼球をうめ込み、試験片の表面を 20% 硝酸液で少量ずつ層状に除去して、ボールの間隔の変化をオプチメーターで $1/1000\text{mm}$ まで読んだ。

いま長さ l なる円筒を直径 $D\text{mm}$ まで腐食したとき長さが l だけ変化したとすれば D 部分の長さ方向の残留応力は

$$\sigma = -\frac{E}{l} \left(\lambda + f \frac{d\lambda}{df} \right)$$

ただし E : 縦弾性係数 $\left(\begin{matrix} E = 2.14 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2 \\ l = 36.4 \text{ mm} \end{matrix} \right)$
 $f = \frac{\pi}{4} D^2$

で与えられる。実験の結果 λ と f との関係は第10図、上式から応力分布を計算すれば第11図のようになる。その結果表面付近には約 30 kg/mm^2 程度の圧縮の残留応力があることがわかった。

5. 疲れ試験結果と考察

5.1 調質平滑試験片

鋳肌のままのものは機械仕上げしたものよりも疲れ限度が低下し、A材のほうは機械仕上げ試験片の疲れ限度の73%、B材のほうは67%であった。これは鋳肌表面の凹凸による切欠効果と脱炭層のために低下したものである。しかしどちらがどの程度影響しているかをつかむことは困難である。ほかの文献⁽¹⁾⁽²⁾においても鋳肌のままのものは機械仕上げしたものより疲れ限度が約30%程度低下しており、本実験の結果と一致している。

これらの文献には鋳肌面の荒さが明らかにされていないからただちに本実験とは比較できない。しかし鋳肌面の凹凸のうち、うねりの大きいものは先端の曲率半径が大きくそれほど切欠効果は大きくない。また小さい凹凸が沢山あるものは多数の切欠が接近しているためいわゆる多重切欠となってやっぱり切欠効果はそれほど大きくはない。その上脱炭層があるからその部分の切欠感度も低下している。したがって特に悪い鋳肌面以外では、鋳肌面の状態が多少変化しても疲れ限度の低下率は大きく変化することはないと考える。したがってこのような低合金鋳鋼や普通炭素鋳鋼では鋳肌のために約30%程度疲れ限度が低下すると考えてよい。

5.2 調質切欠試験片

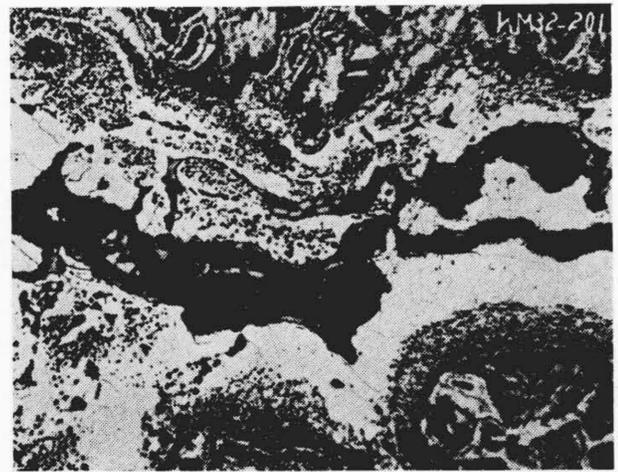
機械仕上げをした切欠試験片は形状係数 $\alpha = 1.63$ のものが切欠係数 $\beta = 1.50$ となったが、鋳肌のままのものは疲れ限度が 10 kg/mm^2 と非常に低下した。この試験片中疲れ試験を行わなかったもの3本について切欠部を縦断してエッチングしてみると、すべてに第12図の写真に示すようなきれつがあった。このきれつに沿ってかなり大きな脱炭層があるから、恐らく鋳込みの際生じたきれつであろう。したがってこの実験に使用した形状係数 $\alpha = 1.63$ の鋳肌切欠試験片は、切欠底にきれつをもっていたためにこのように疲れ限度が低下したと考えるべきである。

形状係数 $\alpha = 1.40$ の鋳肌切欠試験片には切欠底にきれつはまったく認められず疲れ限度は 17 kg/mm^2 であった。

$\alpha \leq 2$ 程度の機械仕上げ切欠をもった試験片の β はほぼ α に比例する。 $\alpha = 1.63$ の切欠をもった試験片の $\beta = 1.50$ であるから、 $\alpha = 1.40$ の機械仕上げ切欠試験片は $\beta \cong 1.3$ 程度であろう。したがってこの疲れ限度は $33/1.3 \cong 25.5 \text{ kg/mm}^2$ となり、鋳肌切欠試験片は約32%程度低下したことになる。すなわち鋳込みの際や熱処理の際切欠底にきれつが発生しなければ、鋳肌のままの切欠材は機械加工で同じ切欠をつけたものより約30%低下すると考えられる。 $\alpha = 1.40$ のものには鋳込みの際きれつを生じていなかったけれども、このような切欠部分にはきれつが鋳込みの際でできやすい。したがって切欠部は特にきれつの有無を調べなければ非常に危険である。もしきれつがあれば使用できない。

5.3 一部高周波焼入平滑試験片

機械仕上げしたものはいずれも焼がはいった部分から破断し、その疲れ限度が 27 kg/mm^2 と調質材より低かったので境界部が調質した素材より強いかわ弱いかわ判明しなかった。鋳肌のままのものは焼がはいっていない部分から破断し、しかも疲れ限度が鋳肌調質試験



第12図 切欠底のきれつ (×400)

片と同じであるから、焼入境界が調質材より弱くならないことがわかった。

5.4 高周波焼入平滑試験片

表面を機械仕上げしたものはばらつきが非常に大きく、はっきりした疲れ限度は求められなかった。しかし調質平滑試験片の疲れ限度 33 kg/mm^2 およびそれ以下の応力で破断している。しかも一部高周波焼入したものの焼がはいった部分の疲れ限度が 27 kg/mm^2 であるから、高周波焼入を施すとかえって疲れ限度が低下したことになる。試験片はすべて磁気探傷器で表面を詳細に調べきれつのないことを確かめたあとに疲れ試験をしたものである。

一般に普通の炭素鋼に高周波焼入を行って著しく疲れ限度が上るのは、表面に生ずる圧縮の残留応力と、材質的な向上のためである。もし表面に引張の残留応力が生じた場合にはかえって疲れ限度が下がることも有りうるが、本実験の場合は圧縮の残留応力が生じていたから疲れ限度の低下の原因は残留応力のためではない。焼入によって材質が向上すれば硬度、抗張力ともに上昇するが切欠感度も上がるがニッケルクロムマンガン鋳鋼のような材料は焼入性がよいため高周波焼入のような急激な焼入で micro-crack が発生しやすく、また鋳鋼であるためスラグなどの欠陥を内蔵している。しかもこの材料は本来材質的に強く、中炭素鋼のように材質的な向上は望めない。したがって高周波焼入による材質向上の度合より切欠感度の上昇がまさり、総合的には疲れ限度が低下するものと想像される。高周波焼入によって疲れ限度が低下した原因について明確にするにはさらに検討の余地があるが、磁気探傷の結果目に見えるような割れがないにもかかわらず疲れ限度が低下したことは注意に値する。従来いかなる材料も高周波焼入を行って磁気探傷で割れが発見できなければ強度が上がると考えられがちであったが、高周波焼入の方法や材質の選定を誤ると危険なことがわかる。

鋳肌材のものは高周波焼入によって多少疲れ限度が上がっているから一見前の結果と反するように思われる。しかし前にも述べたように鋳肌材の表面は脱炭しているため表面は材質的に非常に弱化している。これが高周波焼入によって材質的に向上し、しかも表面では炭素量が低いいため切欠感度が上がらず micro-crack の発生もないため多少疲れ限度が上がるものと考えられる。

5.5 高周波焼入切欠試験片

この場合も機械仕上げしたものはばらつきが大きく疲れ限度が求められなかった。鋳肌切欠試験片は切欠底にきれつがあるにもかかわらず非常に疲れ限度が上がった。これはおもに高周波焼入によってきれつ先端に生じた圧縮の残留応力と、脱炭で弱化されていた材質の改善のためと思われる⁽³⁾⁽⁴⁾。

しかしこのようにきれつを持ちながら大きな圧縮の残留応力によって強度が著しく上がっている部材は大きな応力下で使用すると、過負荷の際きれつが進行して有効断面積が減少しついには破壊する恐れがあるからはなはだ危険である。

6. 結 言

実験の結果をまとめると次のようになる。

- (1) 普通の鑄肌面をもった普通炭素鑄鋼，低合金鑄鋼では鑄肌のために約30%程度疲れ限度が低下すると考えてさしつかえない。これは鑄肌面の凹凸による切欠効果と表面の脱炭による材質低下のためである。
- (2) 鑄肌のままのものは高周波焼入によって多少疲れ強さを改善できる。しかし機械仕上試験片に高周波焼入をしたものは，その表面に磁気探傷で発見できるような割れがないにもかかわらず調質したものより疲れ限度が低下したことは注目に値する。この低下の原因究明には今後の研究にまたねばならない。
- (3) 高周波焼入によって生ずる焼入境界層の強さは素材より弱くなることはない。
- (4) 鑄肌のままの切欠試験片には鑄込みの際切欠底にきれつを生ずる恐れがある。もしきれつがあると著しく疲れ強さが低下する。きれつのある切欠試験片は高周波焼入でかなり疲れ強さが上

がるが，これはきれつ先端に生ずる圧縮の残留応力のためであるから，大きな応力のもとで使用するのは危険である。

以上の結果から，大きな力を受ける機械部品を鑄肌のまま使用するには切欠部に鑄造の際きれつができやすいから必ずきれつを生じないことを確認し，もしきれつができる場合は使用できない。

鑄肌をもったものの設計の許容応力は機械仕上げのものより30~40%低くとらねばならない。鑄肌面に高周波焼入を施せば多少強度の低下が押えられる。しかし中炭素鋼のロール材に高周波焼入を施したような大きな効果は期待できない。

終りに本研究に対しご助言を賜った九州大学石橋教授，東京大学鶴戸教授に心からお礼申しあげるとともにご指導，ご激励くださった当工場の関係者に深甚なる謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) Siebel: Handbuch der Werkstoffprüfung 2Bd. p 212
- (2) E. B. Erans: Proc. ASTM. 1956 p 979
- (3) 石橋正: 材料試験 5, 540 (昭31-9)
- (4) 中村宏, ほか: 鉄道技術研究資料 14, 55 (1957-2)



特 許 の 紹 介



特許第259576号

小谷政雄・塩川 博

スクレーパホイストの制動装置

ドラム D₁, D₂ に巻きつけたメインロープ R₁, R₂ によりスクレーパケット B を操作して鉱石などの運搬を行うスクレーパホイストでは，その使用条件により両ロープを上巻きまたは下巻きとし，くり出し側のロープのゆるみをとるために重錘式制動装置 W・B により常時ドラムを制動している。

しかし，従来の重錘式制動装置ではロープを下巻きとした場合には所期の目的を達成することができるが，上巻きとした場合にはひっぱり側のドラムが強く制動されくり出し側のドラムが弱く制動されるため，くり出し側におけるロープのゆるみを防止することができないばかりでなく，機械的損失が大きい欠点がある。

- この発明は前記の欠点を除くため次のような構造にした。
- (1) 重錘 3 をとりつけたブレーキレバー 6 の基部 6a と，その基部をはさませたリンク 8 およびベルクランク 9 を同一ピン 10 上にそれぞれ揺動できるようにとりつけ，リンク 8 の一端にはブレーキバンド 1 の一端を連結する。
 - (2) ベルクランク 9 の一端にはブレーキバンドの他端を連結し，リンク 8 およびベルクランク 9 の他端側にはそれらを制止するストップ 14 を固定し，止めネジ 13 によりリンク 8 とブレーキレバー 6 の基部またはベルクランク 9 とブレーキレバー 6 の基部とを連結する。

つぎに，上巻き下巻きにわけてこの発明の制動装置の操作および作用を述べる。

(A) 上巻きの場合

止めネジ 13 によりリンク 8 と基部 6a とを連結する。したがって，ベルクランク 9 は自由になっている。この場合の制動力は下記のようなになる。

- 引張り側ドラム.....時計方向回転.....制動力小
- くり出し側ドラム.....反時計方向回転.....制動力大

(B) 下巻きの場合

止めネジ 13 によりベルクランク 9 と基部 6a とを連結する。したがってリンク 8 は自由になり，制動力は次のようになる。

- ひっぱり側ドラム...反時計方向回転.....制動力小
- くり出し側ドラム.....時計方向回転.....制動力大

すなわち，この発明の制動装置では，止めネジ 13 の取付け変更により，上巻き下巻きどちらの場合でも，くり出し側のドラムを強く制動してロープのゆるみを確実にとることができる。したがってロープのゆるみによるホイストへのからみつき，シーブからはずれその他の事故がなくなる。(富田)

