高周波部分焼入れしたときの大形試験片による疲れ試験結果について*

中 村 宏**, 西 岡 邦 夫***

On the Fatigue Test, when Certain Portions of Large Test Pieces are Induction Hardened

by Hiroshi NAKAMURA and Kunio NISHIOKA

When induction hardening is applied to axles, armature shafts and crank shafts, there is an apprehension that the fatigue strength may be reduced in the transitional zone between the hardened and the nonhardened parts.

To disperse such apprehension, a rotary-bending-fatigue test was made on a partially induction-hardened large test piece (dia=70 mm).

The following facts have been revealed through the test:

- i) The fatigue strength of the transitional zone is not reduced but rather improved in comparison with that of the mother material.
- ii) Fatigue cracks happened at a spot considerably removed from the transitional zone.

Following the fatigue test, the residual stress in the test piece was measured using strain gauges with the results showing that the residual stress of the transitional zone is a compressive one, which presumably explains the above facts (i) and (ii)

1. は し が き

走行中の車軸に働く応力は応力測定の結果の一例⁽¹⁾~⁽⁴⁾では、10 kg/mm² 程度であり、また車軸の疲れ限度は著者の一人の実験⁽⁵⁾では、直径 50 mm の圧入試験片で現行車軸材については σ_{w2} [†] は 10.5 kg/mm², Horger⁽⁶⁾ が 50.8 mm の圧入試験片について行った実験では σ_{w2} = 12.3 kg/mm², σ_{w1} = 7.0 kg/mm² であった。応力と疲れ限度は近接しているので、車軸の圧入部にはきず入りが時に発生し、また、車軸全体が折損することがある。

したがって、車輪を車軸に圧入した部分の疲れ限度を高めれば、車軸のきず入りや折損の大部分は防止しうると考えられる。そこで、かつて著者の一人⁽⁵⁾は、圧入部分に高周波焼入れをして疲れ試験をしたところ第 1 表のようになり、圧入部分の疲れ限度は高周波焼入れによって著しく上昇し、約 3 倍になることを見つけた。

実験室では非常に好成績を収めたので、高周波焼入

第 1 表 直径 50 mm 圧入試験片疲れ限度

熱 処 理	疲れ限度 kg/mm ²
焼 な ら し	10.5
焼 入 れ 焼 も ど し	11.0
高周波焼入れ、加熱時間 24 s もどしなし	33.0

れした車軸を昭和 26 年以来、国鉄、阪神、京王帝都および東急にて試験的に使用しているが今のところ問題がない⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

しかしながら、車軸に高周波焼入れすることを普及せしめようとする時、一部実務担当者に質問されて困るのは、高周波焼入れによって圧入部分の疲れ強さはなるほど上昇するが、焼入境界部の疲れ限度は低下するのではないかということである。

著者の一人はかつて、直径 10 mm の小形回転曲げ試験片⁽¹⁰⁾、と直径 25 mm のねじり試験片⁽¹¹⁾について、それぞれ車軸材についての高周波部分焼入れした場合に、焼入境界部の疲れ限度の低下のおそれのないことを確かめたが、実物に近い大いさのものについての同様な実験例がなかったので、人に説得する場合に若干物足りなさを感じていた。

また車軸のみならずクランク軸、歯車等においても高周波焼入境界部の疲れ強さの問題は重要である。

以上のような状況のもとに行ったのが今回の実験で

* 昭和 32 年 10 月 14 日、創立 60 周年記念東京講演会において講演、原稿受付 昭和 33 年 3 月 15 日。

** 正員、鉄道技術研究所（東京都北多摩郡国分寺町平兵衛新田）。

*** 正員、住友金属工業会社製鋼所。

† 応力集中率が大なる時、き裂がはいるか否かの境の応力と、き裂が進行して試験片全体がこわれる意味での疲れ限度は異なる⁽⁷⁾。前者を σ_{w1} とし、後者を σ_{w2} とした。

ある。

2. 使用した疲れ試験機

住友金属工業会社製鋼所にある 4・8 t-m 大形小野式回転曲げ疲れ試験機を用いた。本疲れ試験機の詳細は文献(12)に譲る。

3. 試験材料および試験片

試験材料は八幡製鉄製の車軸材で第2表のごとき化学成分のものである。

試験片は火造り後、850°C で焼ならしをし、平行部を直径 70・4 mm に仕上げたのち、中央部を高周波焼入装置を用いて固定焼入れあるいは移動焼入れをした。その後、(150~200)°C で油煮をし、そのあとで第1図のごとき形状に本仕上げした。

なお、焼入部の長さは第1図の平行部の中央で、固定焼入れの場合が 50 mm、移動焼入れの場合が 150 mm である。

第2表 試験材料の化学成分(%)

C	Si	Mn	P	S
0・32	0・25	0・79	0・011	0・030

第3表 試験材料の機械的性質

降伏点	引張強さ	伸 び	絞 り	衝撃値
36・4 kg/mm ²	58・8 kg/mm ²	33・3%	51・0%	6・4; 6・7
34・8 "	59・1 "	33・2%	49・9%	6・1; 6・1

第1図 大形試験片形状

5%硝酸腐食 × 2

第2図 縦断面のマクロ写真(固定焼入れ)

試験材料の機械性質は第3表のごとくで、疲れ試験片のチャックの部分より試料をとり求めた結果である。

4. 高周波焼入れ状況の調査結果

高周波焼入れは住友金属製鋼所にある TOCCO Crank Shaft Co. 製高周波焼入装置(10 000 サイクル)を用いて行ったもので、試験片の焼入状況を知るために縦断面のマクロ写真、顕微鏡写真、かたさ測定などを行った。

4・1 固定焼入れの場合 第2図は縦断面のマクロ写真で、硬化部分が黒くでている。これより判定される硬化層の深さは約 6 mm で、軸方向長さは 50 mm である。第3図は焼入部断面内の顕微鏡写真の一例である。

また第4, 5図はかたさ測定結果で、第4図は試験片表面で軸方向に測定したもの、第5図は表面より 1 mm 中にはいつたところの軸方向のかたさ変化で、境界部でのかたさ変化も一様で不連続になっていないことがわかる。第6図は断面の中心に向ってのかたさ分布で、硬化層の深さが約 6 mm である。

4・2 移動焼入れの場合 第7図は縦断面のマクロ写真で、第8図は顕微鏡写真を示した。

第9, 10図はかたさの測定結果である。

5. 疲れ試験結果

5・1 固定焼入れ大形疲れ試験結果 第4表は固定焼入れした大形試験片の疲れ試験結果である。

さて、これらの試験結果の中で破断した試験片の破

第4表 固定焼入れ大形試験片疲れ試験結果

試片番号	繰返し応力 kg/mm ²	繰返し数	備 考
2	30・0	1・118×10 ⁵	破 断 す
1	28・0	3・174×10 ⁵	"
5	26・0	2・046 5×10 ⁶	"
4	25・0	1・036 3×10 ⁷	破 断 せ ず
6	24・0	1・079 8×10 ⁷	"
3	22・9	1・034 0×10 ⁷	"

第5表 移動焼入れ大形試験片疲れ試験結果

試片番号	繰返し応力 kg/mm ²	繰返し数	備 考
3	35・0	1・112×10 ⁵	破 断 す
2	29・0	5・885×10 ⁵	"
1	27・0	9・372×10 ⁵	"
5	25・0	1・424 5×10 ⁶	"
7	23・0	1・027 0×10 ⁷	破 断 せ ず
6	22・0	1・120 2×10 ⁷	"

第 3 図 高周波焼入れした場合の焼入部および素材部の顕微鏡写真 5% ピクリン酸腐食

第 4 図 試験片表面の軸方向かたさ分布(固定焼入れ)

第 5 図 表面から 1mm のところの軸方向のかたさ分布(固定焼入れ)

第6図 焼入部断面の表面附近の
かたさ分布(固定焼入れ)

5%硝酸腐食 ×1
第7図 縦断面のマクロ写真(移動焼入れ)

面および破断位置の一例を示したのが第11図である。この一例からもわかるように、破断はすべて中央50mmの焼入部よりかなり離れた平行部からフィレット部へ移る附近で起っている。すなわち、焼入境界部は焼入れされていないところより弱くならない事がこれでわかった。

5.2 移動焼入れ大形疲れ試験結果 第5表は移動焼入れした大形試験片の疲れ試験結果である。

この場合も、破断部はすべて焼入境界部より離れた外側でおこっており、境界部は弱くないことがわかった。

5.3 高周波焼入試験片と焼入れしない試験片とのS-N曲線の比較 第4, 5表に示した高周波焼入試験片の疲れ試験結果と、かつて著者の一人がその協同研究者⁽¹²⁾とともに行った同じ鋼材、同じ試験片形状で高周波焼入れしていないものの疲れ試験結果とを比較するために第12図に各場合のS-N曲線を示した。こ

れからわかるように、高周波部分焼入試験片の疲れ限度は、焼入れしないもののそれに比し約1~3 kg/mm²大になっており、局部的に高周波焼入れすると、焼入部はもちろん強くなるが、焼入境界部も決して弱くなることはなく、全体としての疲れ強さが大になることが明らかになった。

なお、同図には寸法効果の検討をするために10mmφの小形試験片を用いて、小野式疲れ試験機でえられたS-N曲線もあわせ示してある。

6. 試験結果に対する簡単な考察

6.1 上述の試験結果より明らかなごとく、平行部に局部的に高周波焼入れすると、焼入れされていない部分の疲れ強さも上昇した。このようなことは以前に小形試験片についての疲れ試験を行った際にも認められ、その理由として当時次のように考えた⁽¹⁰⁾。すなわち、焼入部に発生した残留応力は、焼入部を出ても突然消えるのではなく、徐々に小になってゆく。したがって、平行部の長さに比し、焼入部の長さがかなりある場合には、疲れ試験で破断した箇所にもなおある程度の残留圧縮応力が残っており、これが疲れ限度を高める作用をしたものと考えられる。しかし、残留応力の測定は困難で実施しえなかった。

また別に焼入境界部にはある程度残留圧縮応力が存在していることはその後の実験でも確認した⁽¹³⁾のであるが、その時は疲れ試験を行わなかったもので、これらの相互関係を確認することはできなかった。

以上のような訳であるので、今回試験した固定焼入れをしたNo. 1の試験片につき28.0 kg/mm²の繰返し応力で試験を行い、317 400で破断後の平行部より長さ160 mm(焼入部がほぼ中央になるようにして)を切り出し、Sachsの方法で残留応力を測定した。外周上におけるひずみ変化は抵抗線ひずみ計を用いて測定したもので、せん孔断面積と50 mmの焼入部の中央外周上でのひずみ変化の関係は第6表のごとくであった。

第6表 Sachs法によるせん孔面積
と外周のひずみ変化

せん孔面積 cm ²	ϵ_t	ϵ_l	せん孔面積 cm ²	ϵ_t	ϵ_l
1.29	61	58	14.19	315	318
1.94	89	91	16.98	402	419
3.08	102	108	20.11	492	565
4.49	123	112	23.50	630	717
7.31	172	188	27.16	817	968
9.35	186	188	30.98	1 072	1 395
11.64	235	243	34.01	1 325	1 547

ϵ_t, ϵ_l 円周方向および長手方向のひずみで単位は $\times 10^{-6}$

第 8 図一(A) 高周波移動焼入れした場合の焼入部および素材部の顕微鏡組織

×100

第8図一(B) 高周波移動焼入れした場合の焼入部および素材部の顕微鏡組織

×100

第 9 図 試験片表面の軸方向かたさ分布
(移動焼入れ)

第 10 図 焼入部断面の表面附近のか
たさ変化 (移動焼入れ)

No. 5 $\sigma = 26.0 \text{ kg/mm}^2$, $N = 2.0465 \times 10^6$

第 11 図 固定焼入試験片の破断状況

第 12 図 S-N 曲 線

σ_l : 軸方向, σ_t : 切線方向, σ_r : 半径方向

第 13 図 断面内の残留応力分布 (固定焼入れ)

第 14 図 高周波焼入境界部の例

この結果をもとにして求めた断面内の残留応力分布を第 13 図に示してある。また焼入境界部より約 25 mm はなれた点の表面の残留応力は、 $\sigma_t = \sigma_l = -9.9 \text{ kg/mm}^2$ となり、これらの値よりフィレットにかかり始める附近の残留応力を推定すると約 -5 kg/mm^2 となる。この試験片の疲れ試験後のものであるから、試験前に比べると残留応力が少し減少している事も考えられるが、いずれにせよ平行部の中央 50 mm の焼入れにより、焼入れされなかった部分にも圧縮残留応力が発生し、このために疲れ限度が上昇したものと考えられる。文献 (10) で推定したことはほぼ正しかった訳である。

6.2 本実験結果の他の高周波焼入部品への応用 本実験は主として車軸を高周波焼入れする場合の参考資料として、焼入境界部の疲れ

強さを対称として行ったのであるが、本実験結果は曲軸や歯車等の高周波焼入れの場合の参考資料ともなる。

すなわち、曲軸等では第14図のように焼入れの都合上、焼入境界部ができることが多い。その時、焼入境界部の位置の選択や、焼入方法をどのようにするかについて種々の問題が発生する。このような場合、ある焼入方法を選択した場合、焼入境界部およびその近傍の残留応力分布を測定し、その圧縮応力か引張応力かを知らなければ、その方法の適、不適を判定し得、また疲れ限度のおおよその値を推定しうる。

7. 結 び

平行部の長さ 285 mm, 直径 70 mm の大形疲れ試験片において、平行部の中央 50 mm を高周波加熱で固定焼入れした場合および 150 mm を同じく高周波加熱で移動焼入れした場合の疲れ試験を行い以下の事がわかった。

1. いずれの場合にも破断は焼入部よりかなり離れたところでおこっており、焼入境界部が弱くなることはなく、かえってかなり強くなっているものと思われる。
2. いずれの境界も焼入れしない部分で折損した

が、該部の疲れ限度は全く高周波焼入れしない場合に比し、 $1\sim 3\text{ kg/mm}^2$ 高かった。これは該部にも中央部分焼入れのために圧縮残留応力を生ずるからであることがわかった。

3. 高周波焼入れの場合、焼入境界部の疲れ限度低下が心配されていたが、この試片のような場合そのおそれがないことが、本実験の結果判明した。したがって、高周波焼入れを車軸や電動機軸のごとく、圧入部分で弱い部品に安心して用いられ、車軸折損対策として高周波焼入れの有効なことが再確認された。

文 献

- (1) 中村, 西村, 松本, 鉄研 中間報告, 3-88 (昭28-10).
- (2) 車軸折損事故防止対策専門委員会資料 (第2回) (昭28-10).
- (3) 小西, 石野, 鉄研 中間報告, 6-102 (昭30-8).
- (4) 中村, 自転車生産技術, No. 38. (昭32-7), 40.
- (5) 中村, 鉄道業務研究資料, 8, 18 (昭26-11), 3.
- (6) たとえば, 石橋, “金属の疲労と破壊の防止”, p. 194 参照.
- (7) 同上, p. 134 参照.
- (8) 中村, 上田, 甘粕, 佐藤, 鉄研. 中間報告, 6-81 (昭30-7), 1~46.
- (9) T. Miki, K. Nakamura & H. Nakamura, *Bull. of R. T. R. I. Engl. Edit.*, No. 1 (1955). J.N.R.
- (10) 中村, 水馬, 船木, 機械学会論文集, 18, 75 (昭27), 70.
- (11) 中村, 鉄道業務研究資料, 10, 5 (昭28-3), 21.
- (12) 小田, 西岡, 機械学会誌, 58, 441 (昭30), 718.
- (13) 中村, 上田, 甘粕, 鉄道技術研究資料, 14, 2 (昭32),

620.178.152.42.088.23

ロックウェルかたさ試験における弾性回復の問題*

黒木剛司郎**, 小室成功**

Problems of Elastic Recovery in the Rockwell Hardness Testing

by Kōshiro KUROKI and Seikō KOMURO

Elastic recovery of indentation depth and the changes of shape of indentation due to the removal of major load were investigated for several kinds of HRC and HRC specimens by the aids of inductance-type displacement gauge and the photographs of cross-sections. The following were the findings.

(1) Amounts of recoveries become smaller with the decrease of major load. But, its ratios to the initial dimensions under the major load become larger with the decrease of major load and the increase of hardness of specimen.

(2) These tendencies are reasoned well by analyzing the stress distribution at the contact-ing part of indenter and specimen under the condition of plane-strain.

1. 緒 言

今日、金属材料に対して行われている押込みかたさ

試験の原理は、ブリネル、ピッカースのごとく圧こんの表面積を測定する場合も、またロックウェルのごとく押込深さを測定する場合も、主荷重除去後の残留変形(永久変形)を測定量とする点で、いわゆる塑性かたさの測定とも称すべきものである。最近、微小かたさ

* 昭和33年4月1日 第35期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和33年4月25日。

** 正員、茨城大学工学部(茨城県日立市成沢町)。