より算定すればよい。次に中央部材の残留応力は力の平衡条件から

$$\sigma_{t1} = \frac{2F_c}{F_t} \cdot \sigma_{c1} \dots \dots \dots (A \cdot 5)$$

によって算定される。第3表に示した σ_{t1} は (A・4) および (A・5) を用いて求めたものである。なお標点距離は 100 mm でコンパレータにより 1/1000 mm の精度までその長さを測定した。(A・4) および (A・5) を用いて算定した残留応力値と、第1図 A-A および B-B 線で試験片を切断し切断前後の標点距離の変化量から求めた残留応力値とを 1, 2 の試験片について比較してみると第4表に示すごとくであって、両者はほぼ一致することがわかる。

第4表 H 型試験片の残留応力測定法の比較

試験片	σ_{t1} kg/mm ²		誤差 %
	(A・4) および (A・5) 式によ る算定値	切断前後の標点距 離の変化より算定 した値	
1	28・40	28・38	0・07
	26・80	27・54	2・49
2	27・64	28・20	1・98
	26・76	27・01	0・93

焼なまし後には各部材ともクリープ変形をおこして

いるので残留応力を求めるのに上述の方法を採用することはできない。この場合には切断法によって残留応力を算定した。第3表に示した σ_{t4} は切断法によって求めた結果である。

注:—

- (1) 昭和 27 年 10 月 18 日 広島地方講演会において講演、原稿受付 昭和 27 年 12 月 8 日。
- (2) (5) 正員、大阪大学工学部。
- (3) 近畿日本鉄道会社。
- (4) 播磨造船所。
- (6) 佐世保船舶工業会社。
- (7) 焼なましは熱影響部の軟化を主たる目的とする場合もある。
- (8) C. H. Jennings, The Welding Journal, 10, p. 26/29, 1931. その他次の報告に多数の文献が抄録されている。W. Spraragen and G. E. Claussen, The Welding Journal, 16, 1937.
- (9) 固有応力並びにひずみに関する一般理論については、渡辺、溶接学会誌, 17 卷 8 号参照。
- (10) (11) 附録 1 参照。
- (12) 第 4 図において荷重がかかると瞬間的にその荷重に対応するひずみをおこした後、漸次クリープ速度は減少してほぼ一定値をとるに至る。このときのクリープ速度を初期クリープ速度として採用することにした。
- (13) Bailey も定常状態におけるクリープ速度に対し(4・6)と同様の実験式を求めている。R. W. Bailey, Proc. I. Mech. Eng., 131, p. 131/349 (1935).
- (14) 附録 2. 参照。
- (15) S. Timoshenko, Theory of Elasticity, p. 203/212, 1934.

621.824 : 539.431.016.3

焼ばめかくのある軸の疲れ強さに及ぼす高周波焼入の効果⁽¹⁾

大 内 田

久⁽²⁾

The Effect of the High Frequency Induction Hardening on the Fatigue Strength of Shrink-Fitted Shafts

by Hisashi OUCHIDA

This paper presents some test data on the fatigue strength of 12 mm test specimens made of various materials to find how fatigue strength in rotating bending is reduced by the presence of shrink-fitted member, and how such a shrink-fitted shaft may be made stronger by induction hardening. From the test results following facts were revealed.

(1) The fatigue limit of shrink-fitted shaft does not increase in proportion to the tensile strength, and the fatigue limit of the materials of high tensile strength such as Ni-Cr steel or high carbon steel is slightly larger than that of the medium carbon steel, because of the largeness of lowering ratio of the fatigue limit in the former case. So not a remarkable effect can be expected.

(2) By induction hardening, the fatigue limit of shrink-fitted shaft made of middle carbon steel (C 0.4%) increases up to about 2.3 times, and becomes stronger than the shaft made of Ni-Cr steel or of 0.5% carbon steel induction hardened.

(3) From these investigations, it is preferable to use the medium carbon steel (C 0.4

%) for the shrink-fitted shaft in actual machine parts, since the weakening effect on fatigue strength caused by shrink-fitted member is comparably small, and the increasing effect due to induction hardening is considerably large, and moreover the cost becomes cheaper.

Additional data are presented to show how fatigue strength of pre-fatigued shaft is increased by induction hardening, and how hardness of shrink-fitted member influences on the fatigue strength of the shaft.

1. 結 言

一般に機械の軸に かく や軸受等の部材が焼ばめまたは力ばめされると軸の疲れ強さが低下することは、従来数多の研究の実験結果⁽³⁾⁽⁴⁾、から既知の事実である。また圧入部のある軸の疲れ限度に及ぼす高周波焼入の影響については最近中村宏氏の研究結果⁽⁵⁾が発表されている。本文は軸材を Ni-Cr 鋼、各種の炭素鋼に選り、これらに かく を焼ばめした場合の疲れ限度の低下、およびこれらを高周波焼入した後に かく を焼ばめした場合の疲れ限度の上昇につき、回転曲げ疲れ試験によって探究し、焼ばめ部材のある軸の材質

の選定の規準を得ようとしたものである。なおある程度疲れした試料に対する高周波焼入の効果および かく 材と軸材の硬度差の疲れ限度に及ぼす影響についてもしらべた。

2. 研究の方法

(1) 試 料 実験に供した試料は Ni-Cr 鋼、高炭素鋼、中炭素鋼および低炭素鋼で支給された粗材のまま用い特に前熱処理は行わなかった。それらの化学成分および機械的性質は第1表のごときものである。かく材としては低炭素鋼を用いた。かくのかたさの影響を調べるために特に Ni-Cr 鋼に滲炭したも

第1表 試料の化学成分および機械的性質

番号	材 名 称	化 学 的 成 分							機 械 的 性 質				
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	σ_B	σ_s	φ	ψ	V. H.
I	Ni-Cr 鋼 SNC 70	0.37	0.28	0.38	0.027	0.028	3.55	1.18	83.0	52.0	25.0	55.9	220
II	高 炭 素 鋼	0.90	0.17	0.33	0.023	0.010	—	—	101.0	85.0	12.0	13.9	233
III	中 炭 素 鋼 SF 60	0.52	0.17	0.52	0.023	0.020	—	—	64.8	36.2	28.2	46.0	174
IV	中 炭 素 鋼 SF 60	0.42	0.27	0.54	0.021	0.019	—	—	63.9	41.7	27.4	47.9	150
V	中 炭 素 鋼 SF 55	0.37	0.34	0.69	0.020	0.016	—	—	52.0	34.0	34.4	64.8	188
VI	低 炭 素 鋼	0.19	0.25	0.51	0.023	0.016	—	—	47.7	32.5	38.8	65.7	148

σ_B ; 引張強さ kg/mm², σ_s ; 降伏点 kg/mm², φ ; 伸び率 %, ψ ; 断面縮 %.

のを用いた。

(2) 試験片および試験機 疲れ試験は片持はり式回転曲げ試験で第1図にその試験片を示す。試験片

第1図 試験片

の平行部の直径は 12 mm でつかみ部と平行部の段付部の丸みは十分大きくとり、この部の応力集中を緩和することに留意した。

かく は図のごとくつかみ部端より 30mm の位置に

かく端が来るように平行部に焼ばめした。この場合の かく の焼ばめ圧力は疲れ試験後アムスラー試験機により かく を軸から抜出し、その引抜力からかかる場

第2図 片持はり式回転曲げ試験機

合の摩擦係数を種々の実験結果⁽⁶⁾から $\phi=0.1$ と仮定して求めた結果、平均約 10 kg/mm^2 と求まり設計値の 12 kg/mm^2 に近い値を示した。

試験機は第2図に示すとき自家製片持り式回転曲げ試験機で回転数は 1700 rpm である。

(3) 高周波焼入 日立製電動発電機式で $3300 \text{ } \infty, 300 \text{ KVA}$ の高

第3図 かたさ分布

周波焼入装置を用い、試験片に対し焼入深さ 3 mm を目標として焼入時間を約3秒とした。かくして焼入をした各材質の試験片の横断面のかたさ分布および焼入部の顕微鏡写真の代表的なものは第3図および第4図に示す通りである。

3. 疲れ試験の結果

(1) 平滑試験片 第1表の各種材質から作製した試験片に かく を焼ばめしない場合のものを便宜上平滑試験片と称することにする。各材質の軸についての疲れ試験の結果は第5図のごとく求まりこれから疲れ限度を求めると第2表のごとくなる。これから試料の引張強さが大きくなるに従い、その疲れ限度もだいたい比例して大きくなるのがわかる。高炭素鋼の場合は引張強さに比しやや低目に疲れ限度は求まったが、これは粗材の熱処理によるものであろう。試料Ⅲの場合は引張強さと降伏点が等しい同様な材料についての H. Bühler の実験値を金属材料応力編⁽⁷⁾から引

(a) SNC 70

(b) SF 60

(c) SF 55

第4図 焼入部の顕微鏡組織

第5図 平滑試験片の疲れ限度曲線

用しその疲れ限度を 28.0 kg/mm^2 とした。これらの結果から引張強さの高い Ni-Cr 鋼が最も疲れ限度が高いことがわかる。

(2) かく焼ばめ試験片 各種材質の平滑試験片

に低炭素鋼の かく を焼ばめすると疲れ限度はいずれも低下し第6図のごとく求まる。その低下の割合は Ni-Cr 鋼では最も大きく高炭素鋼がこれにつぎ中炭素鋼および低炭素鋼はだいたい等しく最も低下率が小

第6図 かく焼ばめ試験片の疲れ限度曲線

さい。これから Ni-Cr 鋼はかくを焼ばめしない場合はその疲れ限度は他の材質の場合より最も大きい値を示したにもかかわらず、かくを焼ばめした結果は低炭素鋼の場合と同じ程度にまで低下し中炭素鋼よりかえって低い値を示し弱くなることわかる。かく焼ばめによる応力集中のための疲れ限度の低下を便宜上次の切欠係数であらわす。すなわち切欠係数

$$\beta = \frac{\text{平滑試験片の疲れ限度 } \sigma_{wA}}{\text{焼ばめ試験片の疲れ限度 } \sigma_{wB}}$$

とすれば β は各材質の場合につき第 2 表のごとく求まり、Ni-Cr 鋼では 2.26、高炭素鋼 1.66、中炭素鋼 1.54~1.56、低炭素鋼 1.54 となる。

この結果から かく焼ばめ による応力集中のための疲れ限度の低下を切欠によるものと同様に考えると、Ni-Cr 鋼は最も切欠感度が高く中炭素鋼、低炭素鋼は低いといえることができる。

第 7 図 高周波焼入後かく焼ばめ試験片の疲れ限度曲線

(3) 高周波焼入した焼ばめ試験片 Ni-Cr 鋼 (試料 I) および中炭素鋼 (試料 III, V) に高周波焼入した後 かく を焼ばめした試験片の疲れ限度は第 7 図および第 2 表のごとく求まった。試料 III で焼もどしたものはわずかに疲れ限度が低下するが実験値が少いため省略した。いずれも高周波焼入れすることによって かく焼ばめによる応力集中のための疲れ限度の低下を回復し、平滑材の疲れ限度もしくはそれ以上の疲れ限度にまで上昇することがわかる。第 8 図は Ni-Cr 鋼の場合の かく焼ばめ試験片の焼入しないものとしたもの

左；かく焼ばめ試験片
右；高周波焼入後かく焼ばめ試験片

第 8 図 かく焼ばめ試験片の破断面 (SNC 70)

の かく 部よりの破断面の一例を示す。

今 かく焼ばめ試験片の疲れ限度に対する高周波焼入後 かく焼ばめ試験片の疲れ限度の比をもって高周波焼入の効果とすると、各材質について第 2 表のごとく求まる。これらからわかるように中炭素鋼の V 材 (C 0.37) は III 材 (C 0.52) よりも効果が大きく Ni-Cr 鋼と同じ程度の効果を示し、しかも疲れ限度の絶対値は Ni-Cr 鋼の 34.0 kg/mm² に対し 38.7 kg/mm² とかえって高くなっている。これは高周波焼入に対する材質的特徴と考えられ後に検討する。

第 2 表 焼ばめかくのある各種材質の軸の疲れ限度

軸 材 番 号	成 分	か く 材	熱 処 理	疲 れ 限 度 kg/mm²		切 欠 係 数 $\beta = \frac{\sigma_{wA}}{\sigma_{wB}}$	高 周 波 焼 入 の 効 果 %
				かくなし σ_{wA}	かくなり σ_{wB}		
I	C 0.37 Ni 3.55 Cr 1.18	低炭素鋼	粗 材	36.2	16.0	2.26	213
			高周波焼入 焼もどし	>56.0	34.0		
II	C 0.9	"	粗 材	33.1	19.9	1.66	—
III	C 0.52	"	粗 材	28.0*	18.2	1.54	183
			高周波焼入	—	33.4		
IV	C 0.42	Ni-Cr 鋼	粗 材	27.0	17.0	1.59	—
V	C 0.37	低炭素鋼	粗 材	26.5	17.0	1.56	228
			高周波焼入 焼もどし	—	38.7		
VI	C 0.19	"	粗 材	25.0	16.2	1.54	—

かく焼ばめ圧力 約 10 kg/mm²、片持はり回転式曲げ試験による、1 700 rpm.

* H. Bühler の実験値； σ_s 35 kg/mm²、 σ_B 64 kg/mm² の材料

第3表 かくのかたさの疲れ限度に及ぼす影響

軸 番号	材 かたさ V. H.	か く 材		疲 れ 限 度 kg/mm^2		切 欠 係 数 $\beta = \sigma_{wA} / \sigma_{wB}$
		材 質	かたさ V. H.	かくなし σ_{wA}	かくあり σ_{wB}	
III	174	低 炭 素 鋼	147	28.0	18.2	1.54
IV	150	Ni-Cr 鋼	358	27.0	17.0	1.59

(4) かくと軸のかたさの疲れ限度に及ぼす影響

以上の実験では かく が軸よりもかたさの低い場合であるが、逆に かく が軸よりもかたい場合疲れ限度にどの程度影響するかについて一つの実験によってしらべた。すなわち かく材 として I 材に滲炭焼入れし かたさを高くしたものをを用い、その場合の疲れ試験の結果を前記の低炭素鋼の かく を同様な中炭素鋼軸に焼ばめした場合と比較すると第3表のごとく求まる。これから かく が軸に比べてかたい場合の方が逆の場合よりも疲れ限度の低下率が大きくすなわち切欠係数は大きくなる傾向にあることがわかる。しかし かく材のかたさを V. H. 147 から 358 と非常に高くしたにもかかわらず、疲れ限度に及ぼす影響はそれほど大きいものでないことがわかる。これは かく が軸に焼ばめされ一体化の形状をとったために生ずる かく焼ばめ端部 の軸に生ずる応力集中が大きい影響を疲れ限度の低下にもつもので、かく端の かく と軸との繰返し曲げによる相対的すべりや焼ばめ圧力による応力の影響はそれほど大きい影響は持たないものと考ええる。

第4表 疲れた試験片に対する高周波焼入の効果

試験片 番 号	疲 れ の 条 件		高 周 波 焼 入 後 の 疲 れ 強 さ	
	σ_{w0} kg/mm^2	N_0	σ_w kg/mm^2	N
1	47.0	4.40×10^4	73.0	8.60×10^4
2	44.0	1.53×10^5	61.2	2.61×10^5
3	38.2	5.10×10^5	58.3	2.45×10^6

軸材は I を焼ならししたもの、 $\sigma_B = 96.1 \text{ kg/mm}^2$
高周波焼入前に σ_0 の応力で N_0 回荷重をかけて後試験を中止し、焼入後再び σ の応力で荷重をかけ N 回で破断したことを示す。

(5) 補足実験 以上の高周波焼入の効果を実際問題として現在既に使用中の機械の軸に適用する場合を考え、補足実験としてある程度疲れそのまま荷重を繰返すと破断するものに高周波焼入れしたときの疲れ強さの変化をしらべた。疲れの条件としては第4表のごとく破断すると想像される繰返し荷重のもとに、破断までの約 80% の繰返し数まで回した後試験機をとめ試験片に高周波焼入処理をした後再び更に荷重を

増して疲れ試験を行った。表からわかるようにある程度疲れてミクロ的にはクラックが生じていると思われる試験片に対しても高周波焼入をすることにより、その疲れ強さを約 150% 高め相当有効であることがわかる。

4. 実験結果の考察

(1) 焼ばめかくのある軸材の引張強さと疲れ限度
一般に かく のない平滑試験片の疲れ限度と材料

第9図 引張強さと疲れ限度との関係

の引張強さとの関係は、本実験および前記の Thum と Wunderlich 氏の実験のごとく片持はり式疲れ実験の結果を図示すると第9図のごとく求まり、だいたい材料の引張強さと疲れ限度は比例関係にあり、引張強さの大きい材料ほど疲れ限度もその割で大きいことがわかる。

このことはまた H. F. Moor の実験から R. E. Peterson が引用して述べているところでもある⁽⁸⁾。もちろん本実験の高炭素鋼の場合のごとく若干ばらつきはあるが総体的には疲れ限度は引張強さに比例して増大するものと考えられる。

しかるに本実験のごとく平滑試験片に かく を焼ばめしたり、あるいは圧入したりすると、かかる場合の疲れ限度は第9図の下の方の曲線のごとく最早引張強さが増大する割合には大きくなりなくなる。すなわちある程度以上(本実験の場合ではだいたい引張強さ 50~60 kg/mm^2 以上)引張強さを大きくしても疲れ限度は大して増大せず効果が少ない。Ni-Cr 鋼や高炭素鋼のごとく引張強さが大きく平滑材の疲れ限度が高くても、かく焼ばめ材では、それらの特徴が著しく小さくなり効果的でなくなる。

このことは実際の機械の軸であるたとえば電動機軸タービン軸、歯車軸等が多少とも焼ばめまたは力ばめ部材をもっており、その他段付、キース等応力集中部をもっていることを考えるときわめて重要なことであり軸材の選定に注意を要する。すなわち静的引張強さや平滑試験片での疲れ限度が高く、Ni-Cr 鋼のごとき高価で入手困難な軸材を用いても、焼ばめかくやその他の応力集中のある軸に対しては、繰返し荷重による疲れ強さは、低価で入手も容易で静的には弱い中炭素鋼のごとき材料と大して変わらないことになる。これは前述のごとく かく を焼ばめすることが一種の stress raiser をつくることになり、この切欠に対する感度は引張強さの高い材料ほど高いと思われる。したがって軸に要求せられる疲れ限度を考慮し、わずかの差であれば中炭素鋼を使用し Ni-Cr 鋼に代用できる場合も考えられる。本実験のごとき場合は平滑試験片では Ni-Cr 鋼が中炭素鋼 (C 0.37) の約 1.37 倍の疲れ限度をもっているものが、かく焼ばめ試験片ではかえってそれより低い疲れ限度を示す結果を得ている。

(2) 高周波焼入の効果 実験結果から C 0.52 の中炭素鋼よりも C 0.37 の場合の方が高周波焼入による疲れ限度の上昇率は大きく、またその疲れ限度の値も大きいことがわかる。したがって一方高周波焼入によって C 量を 0.5 以上増してもかたさは大して増大しないことと合せ考えて⁽³⁾、C 量を増して引張強さを高くしても前項のごとく切欠係数は大きくなり、また焼割れが生じたり、衝撃値が低下することも考えられるから、かかる焼ばめ部材のある軸材としては C 0.4 程度の中炭素鋼が適当であると思う。

なお C 0.4 程度の中炭素鋼に高周波焼入した場合の疲れ限度の上昇率は実験結果から Ni-Cr 鋼の場合と同じ程度と考えてよいから、かかる焼ばめ部材のある軸材としては高周波焼入する場合も、Ni-Cr 鋼代りに中炭素鋼 (C 0.4) を使用することも誤りではない。ただし細かい応力の値が問題になる場合は更に Ni-Cr 鋼についても前熱処理を十分考えて高周波焼入を行い比較する必要がある。

一方粗材としては炭素鋼は Ni-Cr 鋼よりも衝撃値は低い、高周波焼入したものについては繰返し衝撃

に対しても中炭素鋼の方が特殊鋼よりも有利であると報告されている⁽¹⁰⁾から、もし従来 Ni-Cr 鋼を使用していた機械の軸材に中炭素鋼を用いることが以上の結果より出来れば、原価も安く強さも十分となり有利であると考ええる。

5. 結 言

各種材質の軸に 焼ばめかく のある場合の疲れ限度の低下および高周波焼入した場合の疲れ限度の上昇につき片持はり式回転曲げ試験により探究した結果次のことがわかった。

(1) 焼ばめかく のある軸の疲れ限度は軸材の引張強さに比例して増大しないで、かく焼ばめによる応力集中のため Ni-Cr 鋼や高炭素鋼のごとき引張強さの高い材料を使用しても大して効果がなく中炭素鋼でも同じ程度の疲れ限度が得られる。

(2) 焼ばめかく のある軸に高周波焼入すると、かくのない場合の疲れ限度もしくはそれ以上に疲れ限度は上昇し、C 0.4 程度中炭素鋼では焼入効果は Ni-Cr 鋼に匹敵し疲れ限度の値はかえって高い値を示した。これらのことからかかる焼ばめ部材のある軸材として従来使用していた Ni-Cr 鋼の代りに中炭素鋼に高周波焼入して用いることができる。

(3) ある程度使用して疲れた軸材に対しても高周波焼入すれば疲れ限度の上昇は相当増大する。

終りに本研究に対し有益な助言を賜った九大石橋教授並びに絶えず御鞭達下さった当所兼先所長その他関係各位および実験に協力された岩崎勤君に深く感謝の意を表する。

注:—

- (1) 昭和 27 年 12 月 2 日 第 2 回応用力学連合講演会において講演、原稿受付 昭和 28 年 2 月 28 日。
- (2) 正員、日立製作所日立研究所。
- (3) A. Thum & F. Wunderlich: V. D. I., Bd. 77, Nr. 31 (1933) S. 851.
- (4) O. J. Horger & J. L. Maulbetsch: J. of App. Mech., Vol. 3, No. 3 (1936) A-91.
- (5) 中村宏: 機械学会論文集, 18 巻 75 号 (昭 27-12) p. 64.
- (6) 永島菊三郎: 機械学会論文集, 3 巻 13 号 (昭 12) p. 283.
- (7) 金属材料, 応力編, p. 141.
- (8) R. E. Peterson: Proc. Exp. Str. Analy., Vol. III, No. 2 (1946) p. 149.
- (9) 金属叢覧: 日本金属学会編 (昭 27) p. 1059.
- (10) (5) に同じ。