

キー溝を有する高周波焼入れ鋼(S45C) の回転曲げ疲労強度*

芳賀 武**・西村博之***・関川三男****

Fatigue Strength of Induction Hardening steel (S45C) with a Key Groove in the Experiment of Rotated Bending by

Takeshi HAGA, Hiroyuki NISHIMURA and Mituo SEKIKAWA

This study has investigated out the fatigue strength of induction hardening steel materials. Some kinds of specimen possessed key grooves and some did not. Particularly, the materials with key grooves used in this experiment possessed the various depths of induction hardening. The fracture surfaces were investigated by means of an electron microscope.

The conclusions obtained are as follows:

- (1) Fatigue limits (1×10^7 cycle) increased about 13.6% at the material A (deep induction hardening steel), about 21.6% at the material B (shallow induction hardening steel), and about 8.16% at the material C (steel with no induction hardening). Fatigue limits mentioned above were calculated using fatigue limits of the materials of key grooves as standard of calculation.
- (2) The crack propagation patterns of fatigue was observed in the key groove. In particular, the material A was observed to have crack propagation to the direction of 45 degrees from the root of the key groove.

1. 緒 言

日常生活に使用している電動機の伝動軸は安全を確保するために、いろいろと開発されている。中でも疲労強度は熱処理方法を変えることによって増加したり、減少したりする。従ってこの熱処理方法の選び方は疲労寿命に重要な役割を果す。一般的にはシャフトの部分にキー溝を有する場合が多い。このキー溝が切欠き効果の原因を生む結果と考えられる。従って、シャフトが突然破壊する例もあり、深刻な問題となっている。破壊の原因はキー溝底部に応力が集中⁽¹⁾⁽²⁾するため、き裂の発生と伝ばが進み破壊すると考えられる。キー溝を有したねじり疲労の研究が中川⁽³⁾、山本⁽⁴⁾等によって実験的になされている。実用伝動軸は回転をとめない、ねじり、曲げ両モーメントを同時に受けていることが多い。しかもキー溝を有

* 昭和63年3月 日本機械学会北陸信越学会 第17回学生員発表講演会に一部発表

** 機械工学科 助教授

*** 長野高専 第21期機械工学科卒業 現在日本DEC(株)

**** 機械工学科 教授

原稿受付 昭和63年9月28日

するので複雑な現象要素を含み解析は困難である。

本研究は実際に使用されている丸軸やキー溝を有する材料に高周波焼入れをほどこした疲労強度を回転曲げの方法によって調べることを目的とした。試験材料は4種で、キー溝を有する深い高周波焼入れ鋼（A材）、キー溝を有する浅い高周波焼入れ鋼（B材）、キー溝を有し加工のまま（C材）、およびキー溝がなく熱処理もない（D材）材料について疲労強度を求め、破面模様および硬さから破壊現象を調べ比較検討した。

2. 試験方法

Fig. 1 はキー溝を有する丸棒試験片の形状と寸法を示す。キー溝付近の寸法は $\phi 14$ で、キー溝の深さ 2.5mm、キー溝の先端部 $R=2.5\text{mm}$ の試験片を使用した。

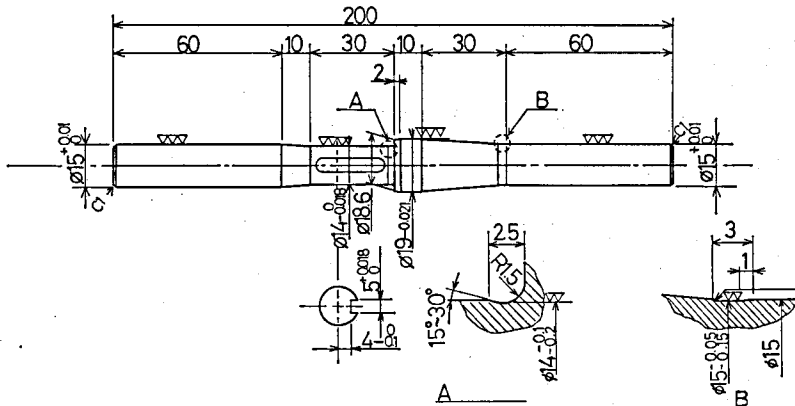


Fig. 1 Form and dimensions of fatigue test specimen,

1) 処理方法としての高周波焼入れは $\phi 30$ のコイルに高周波電流を流し表面部のみを加熱した。サイクル数は 20KHz で加熱時間は 20mm/sec で加熱後水性冷却剤を使って焼入れした。特に浅い方は Fig. 1 に示すA部を 20mm/sec、深い方はA部を 10mm/sec で焼入れした。焼戻し温度は $600\sim 650^\circ\text{C}$ で、加熱時間 1.6 sec とし、移動速度は 9mm/sec で移動し、その後空冷した。

2) 高周波焼入れ鋼の焼入れ状態を調べるため、硬さの測定を行った。硬さは試験片を軸方向に2等分し、その断面の表面から 6 mm までビッカース硬さ試験機を使用し測定した。

3) 疲労試験は回転曲げ疲労試験機により行い、S-N曲線を作成した。Sは応力であり、Nは破壊したときの繰返し数である。

4) 疲労途中の観察は疲労寿命の30、50および75%を液体窒素中に 5 min 間保持後、シャルピー衝撃試験より破壊させ、破面観察は走査型電子顕微鏡で行った。

3. 実験結果および考察

Fig. 2 と Fig. 3 は表面の焼入れ状態を示し、各点における深さ方向の硬さ分布である。

Fig. 2はA部の加熱時間を10mm/secの速度で焼入れした場合である。この時焼入れ深さはFig. 2のキー溝底で硬化層が2.0~3.0mmあるものを深い高周波焼入れ鋼A材とした。キー溝付近の表面硬さはHvで500~600の値を示した。Fig. 3はA部の加熱時間を20mm/secの速度で焼入れした場合である。この時焼入れ深さはFig. 3のキー溝底で硬化層が1.0~1.5mmあるものを浅い高周波焼入れ鋼B材とした。キー溝付近の表面硬さはHvで400~500の値を示した。

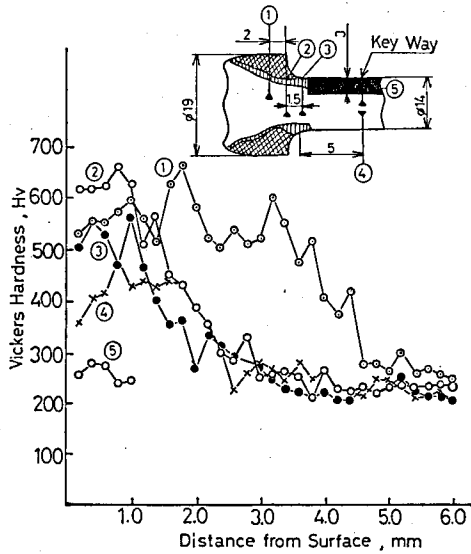


Fig. 2 Hardness Distribution (Material A)

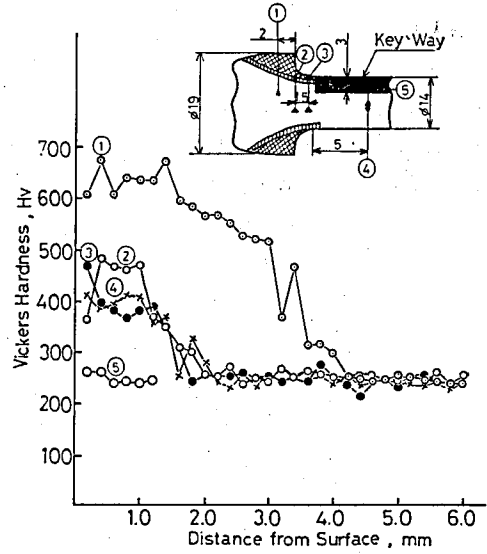


Fig. 3 Hardness Distribution (Material B)

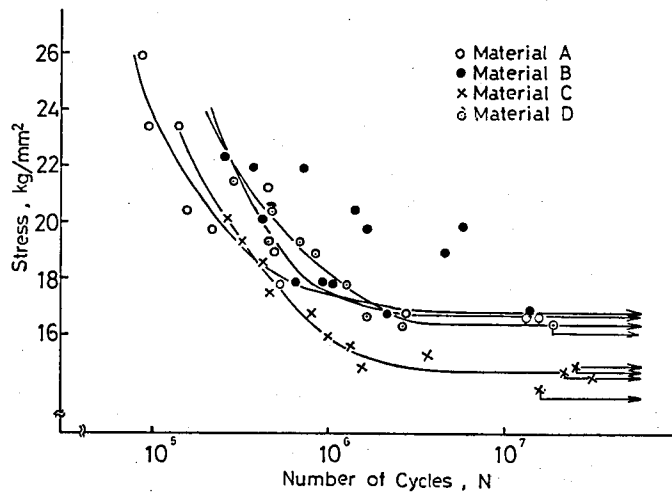


Fig. 4 S-N Curves

Fig. 4は各種の材料に対するS-N曲線を示す。このS-N曲線より強度を比較すると、焼入れなしでキー溝がある場合はキー溝がない場合に比べて非常に弱い。しかしキー溝があって焼入れすると、その強度はキー溝のない場合とほとんど変わらず、疲労限度 (1×10^7 回を言う) は上昇する。

S-N曲線から Table 1 の結果を得た。その結果はC材 (加工のまま) を基準にすると、疲労限度はA材で13.6%、B材で21.6%、D材で8.16%いずれも増加した。また 1×10^6 回、および 5×10^5 回疲労強度はいずれも増加し、中でもD材 (キー溝がなく熱処理もしない) が増大した。

つぎに、Table 2 からD材を基準にすると疲労限度はA材およびB材で増加し、特にB材は約12%増加した。しかし 1×10^6 回および 5×10^5 回強度では減少し、中でもA材は 5×10^5 回強度で11.2%減少した。このことは焼入れすることによって疲労強度は増すが、 1×10^6 回および 5×10^5 回強度では逆に減少する。また、浅い焼入れ材 (B材) は Fig. 1 に見られるようになりばらつきがあり、不安定である。つぎに疲労途中の破面模様を観察するために、筆者らの1人が提案した方法⁽⁶⁾を使用した。

Fig. 5は疲労寿命の30、50および75%で運転中止し、その後衝撃用試験片に加工し、液体窒素中に10min保持後、衝撃を行った。

C材とD材の衝撃吸収エネルギーは30%以降急激に減少する。しかしA材とB材の焼入れ材は50%以降急激に減少する。このことよりC材とD材は30%以降疲労進展が急速に進むのに対

Table 1 MATEBIAL C BASE

	Material A	Material B	Material D
1×10^7	+13.61%	+21.09%	+ 8.61%
1×10^6	+ 8.87%	+ 9.40%	+14.11%
5×10^5	+ 2.25%	+ 8.43%	+15.17%

Table 2 MATERIAL D BASE

	Material A	Material B	Material C
1×10^7	+ 5.03%	+11.95%	- 7.55%
1×10^6	- 4.6%	- 4.12%	-12.36%
5×10^5	-11.22%	- 5.85%	-13.17%

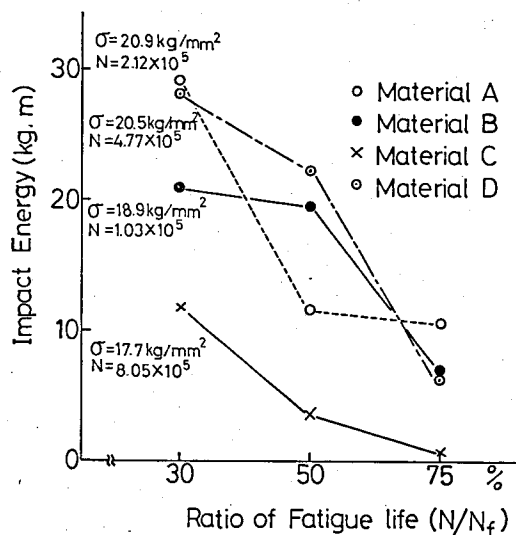


Fig. 5 Relation between Impact Energy and Ratio of Fatigue life

し、A材とB材は50%以降疲労進展が急速にむ進ようである。しかしこの衝撃吸収エネルギーと疲労強度との関連性は不明である。

photo. 1 から photo. 4 はそれぞれの材料に対する破面模様を示したものである。疲労寿命 100%と疲労寿命の30, 50および75%のときの破面模様である。破損はキー溝付近から発生し、特にキー溝底R部からキ裂の発展を観察する。photo. 1 は深い高周波焼入れのA材を示す。キー溝底の先端部付近から疲労が進展し、内部に伝ばする。中でもキー溝底R部より下方向45°に大きなクラックの痕跡が観察された。photo. 2 は浅い高周波焼入れのB材を示す。A材と同様、キー溝底R部より疲労が進展し、内部に伝ばする模様が観察された。伝ばを示すストライエーション模様が観察され、このストライエーションはキー溝底R部に非常に細かく観察されたことから、焼入れによる効果と判断することができる。

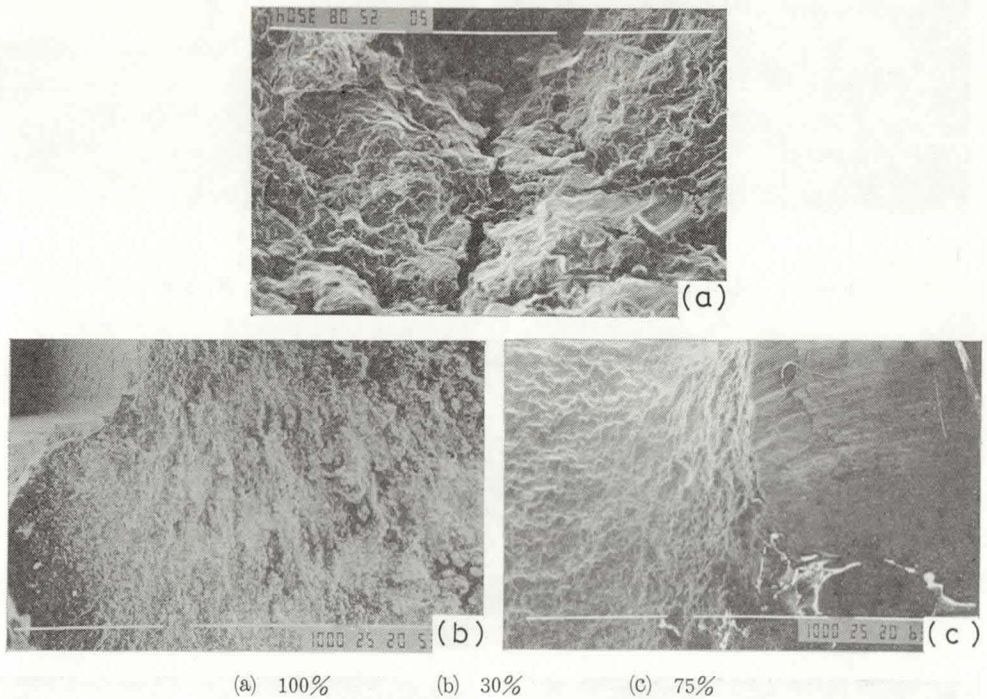


photo.1 SEM fractographs (Material A, $\sigma=53\text{kg/mm}^2$, $N=2.12 \times 10^5$)

photo. 3 はキー溝を有し加工のままのC材を示す。100%破断時で photo. 3 (a)はキー溝底付近で45°方向にき裂の凸凹破面が明瞭に観察された。photo. 3 (b)と(c)は内部の疲労進展模様を示し、ストライエーションの比較的大きな模様が観察された。

photo. 4 はキー溝がなく熱処理もないD材を示す。通常のS45C材と同様の模様⁽⁶⁾が観察され、ストライエーションを初め、中央部にはデインブル模様などが観察された。

上記のことから、キー溝底の加工精度が重要な役割を果たすとともに、焼入れをすれば強

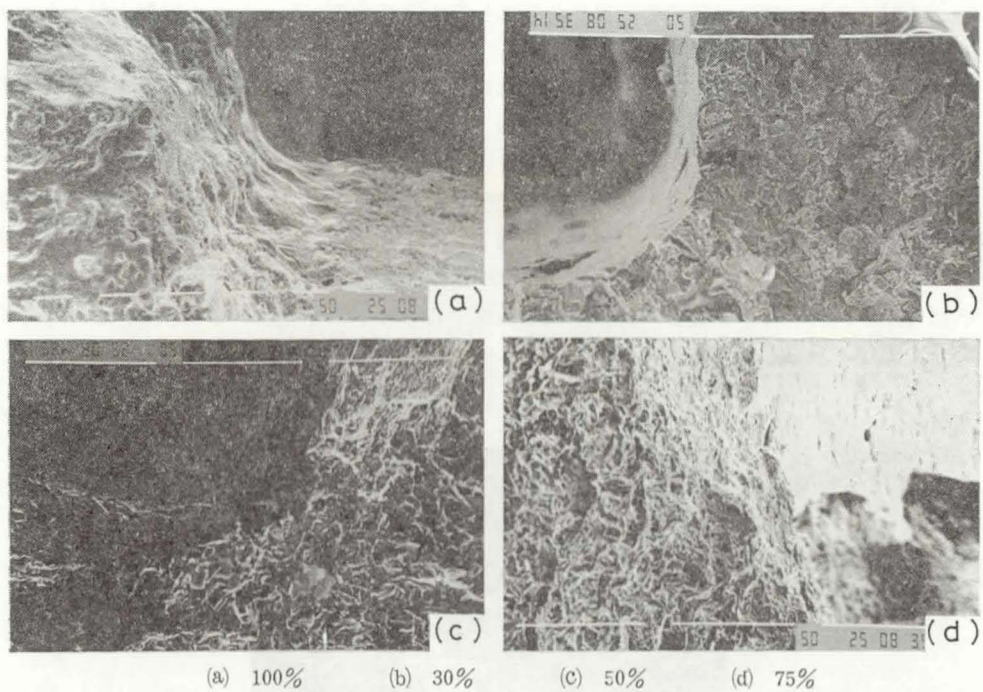


photo.2 SEM fractographs (Material B, $\sigma=48\text{kg/mm}^2$, $N=1.03\times 10^6$)

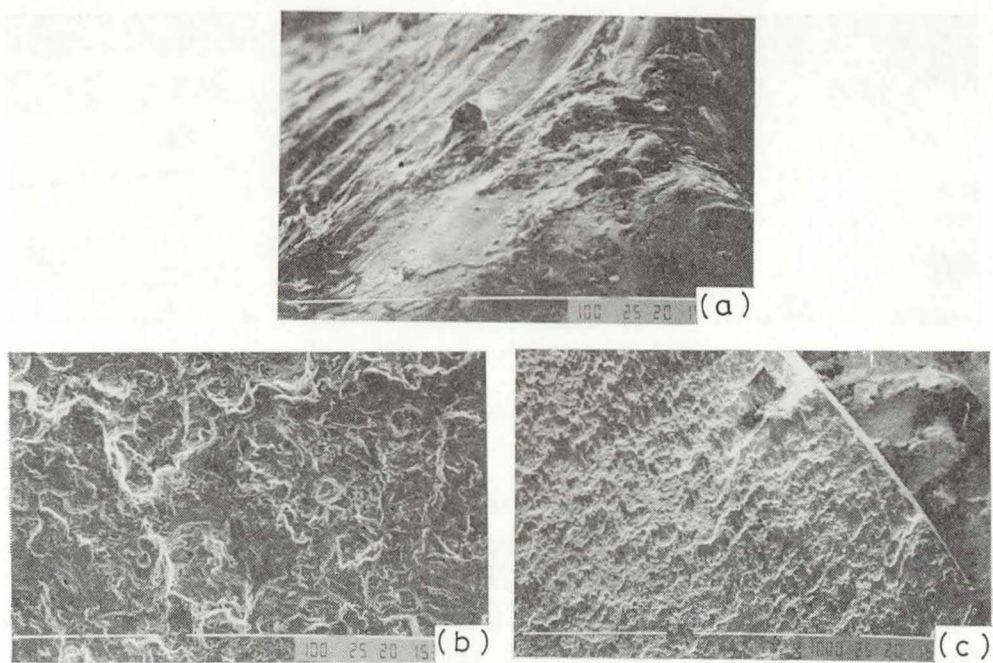


photo.3 SEM fractographs (Material C, $\sigma=40\text{kg/mm}^2$, $N=1.59\times 10^6$)

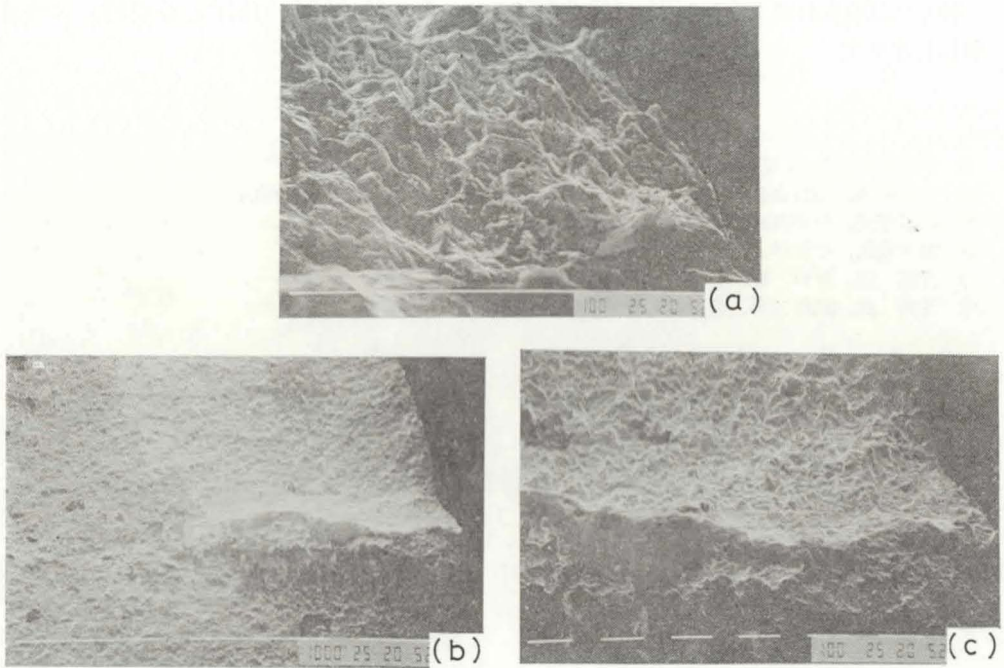


photo.4 SEM fractographs (Material D, $\sigma=52\text{kg/mm}^2$, $N=4.77 \times 10^5$)

度は良くなるが、その焼入れの程度に問題がある。すなわち、焼入れ層に対する強度と切欠き強度とを混合した実験であるため、今後は特に加工精度などに十分注意して多くの試験を試みる必要があると考える。

4. 結 論

キー溝を有する高周波焼入れ鋼の回転曲げ疲労強度を実験的に調べた。試験片の種類はキー溝を有するものとキー溝なしのものを使用した。疲労破断後および疲労試験を中断した途中の破面についてフラクトグラフィ観察を行った。その結果、

つぎのような結論を得た。

(1) キー溝を有する材料 (C材) を基準に考えたならば、疲労限度 (1×10^7 回) は A材 (深い高周波焼入れ鋼) で13.6%, B材 (浅い高周波焼入れ鋼) で21.6%, およびD材 (高周波焼入れしない鋼) で8.16%上昇した。

(2) 衝撃吸収エネルギーはC材とD材で30%以降急速に減少するのに対して、A材とB材の高周波焼入れ鋼は50%以降急速に減少する。

(3) 疲労のき裂進展模様はキー溝底部で観察され、高周波焼入れ鋼材はストライエーション模様が細かく、特に、A材はキー溝底R部より下方向 45° に大きなクラップの痕跡が観察された。

以上のことより、キー溝底の加工精度が重要な役割を果たす。

終りに試験片の提供と作製に当たり御協力下さった山浦一仁氏（山洋電気（株））に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 西田正孝, "応力集中" p. 659 (1978) 森北出版.
- (2) 大久保肇, 細野喜久雄, 榊 芳, 日本機械学会論文集, 32, 16 (1966).
- (3) 中川隆夫, 徳納久睦, 杉山昭司, 材料, 33, 454 (1984).
- (4) 山本義秋, 中川隆夫, 徳納久睦, 大嶋正和, 材料, 35, 337 (1986).
- (5) 芳賀 武, 野口 徹, 日本金属学会誌, 52, 755 (1988).
- (6) 芳賀 武, 関川三男, 長野高専紀要, 14, 1 (1983).