資 料

高温ばね用鋼の 400℃ 以下におけるねじり

ク リ ー プ に つ い て*

上 田 太 郎** 松 尾 哲 夫**

On the Torsional Creep of High-Temperature Spring Steels at Temperatures below 400℃

by

Tarō UEDA and Tetsuo MATSUO

(Faculty of Engineering, Ōsaka University, Ōsaka)

The present work has dealt with the torsion creep behavior and the torsion creep strength at moderate temperatures of quenched and tempered hot-work die steel (SKD 5), high speed steel (SKH 2) and JIS spring steel (SUP 6) which were used for high-temperature spring material. Torsion creep test were carried out on 5 mm ϕ solid cylindrical specimen at 150°, 300° and 400 °C under a stress of 12~45% of static torsional strength.

In the case of 150 °C of SUP 6 and 300 °C of SKD 5, creeping did not proceed after about 300 hours, but at 300 °C of SUP 6 and SKH 2 and 400 °C of SKD 5 and SKH 2 creeping was continued even after 400 hours with decreasing the creep rate. The torsion creep strength for a strain of 0.03% in 100 hours of 300 °C of SKD 5 was 28 kg/mm², and for 400 °C was 23 kg/mm². For 300 °C of SKH 2 was 41 kg/mm², and 18 kg/mm² for 400 °C. And also, for 150 °C and 300 °C of SUP 6 were 34 kg/mm² and 16 kg/mm², respectively.

(Received July 4, 1964)

1 緒 言

近年高温用ばねの要求が高まり、熱間ダイス鋼 SKD 5 や高速度鋼 SKH 2 はすぐれた高温用熱間成型ばね材として注目され、JIS ばね鋼中 SUP 6 は比較的高温用として知られている。通常これらのばねは焼入焼きもどしして用いられ、その使用温度も焼きもどし温度より低い 400℃ 以下であるが大荷重下においてはクリープが問題となり、このようなクリープの研究が要望されてきた。しかるに、今日のところ 18—8 鋼、Inconel X、17-7PH⁵⁾ など非焼入ばねについての中間温度域のクリープの研究が二、三見られるが焼入焼きもどしばね鋼についての研究は見あたらない。そこで本研究は焼入焼きもどした SUP 6, SKD 5, および SKH 2 について 150℃~400℃ のねじりクリープ試験を実施し、クリープ挙動を観察するとともにねじりクリープ強度を求め、高温用熱間成型ばねの設計資料を

提供せんとするものである。

2 実 験 方 法

2・1 供試材料および試験片

実験に供した試料は JIS ばね鋼 SUP 6, 熱間ダイス鋼 SKD 5, 高速度鋼 SKH 2 につき圧延丸棒より採取したもので、Table I にその化学成分を示している。Table II は熱処理温度ならびに熱処理後の機械的性質である。ねじりクリープ試験片は Fig. 1 に示す 5mm ϕ × 50mm 棒で、SKH 2 に対しては 4mm ϕ のも採用した。高温ねじり試験片は Fig. 2 に示している。

2・2 試験装置と試験方法

実験に使用したねじりクリープ試験機は既報のものとはほぼ同じで Fig. 3 に示している。チャック棒の直径は試験片直径の約 3.5 倍であり、ここに働く応力は試験片の応力の $1/40$ でこれによるクリープが起こるとは考えられないので、ねじりクリープひずみの測定は下チャック棒上に取り付けた鏡の振れを望遠鏡で読み

* 原稿受理 昭和39年7月4日

** 正 会 員 大阪大学工学部 大阪市都島区東野田

Table I. Chemical composition of test specimens.

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	W	V	Cu
SUP 6	0.55	1.56	0.84	0.016	0.023	0.09	0.04	—	—	0.13
SKD 5	0.29	0.17	0.41	0.010	0.010	2.49	—	9.12	0.48	—
SKH 2	0.75	0.19	0.30	0.013	0.008	4.33	—	17.82	1.04	—

Table II. Heat treatment and mechanical properties.

Steel	Heat treatment	Yield point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Hardness H _{RC}
SUP6	850℃ oil quenched and 510℃ tempered	120	133	17	39
SKD5	1100℃ oil quenched and 560℃ tempered	—	155	7	40
SKH2	1280℃ oil quenched and 570℃ tempered	—	158	1.5	60

Fig. 1. Specimen for creep test.

Fig. 2. Specimen for torsion test.

とることによって測定した。ただし、チャック棒の弾性ひずみは別に検定し、クリープ試験で求めた瞬間ひずみからこれを差し引いた。そのほか試験機の詳細や試験手順は既に報告しているのでここでは省略する。なお、高温ねじり試験は上述 Fig. 2 の試験片をチャックを介し電気炉中で試験温度に10分間保ち、アムスラー型ねじり試験機で行なった。

3 実験結果および考察

3・1 高温ねじり試験結果

ふさわしいねじりクリープ試験応力の範囲を決定するためクリープ試験に先立ちクリープ試験温度と同じ温度のねじり試験を行なった。その結果を Table III に示している。ここにねじり強さは公称応力で表わし、破断角は有効長12mmを基準に求めた。SKH 2 が、300°, 400℃とも最高の強さを示し、SUP 6 は最低である。

3・2 ねじりクリープ曲線

Fig. 3. Schematic diagram of torsion creep testing machine.

Table III. Torsion test results.

	Steel	150℃	300℃	400℃
Torsional strength τ_r (kg/mm ²)	SUP 6	105	85	—
	SKD 5	—	123	114
	SKH 2	—	157	147
Torsional rupture angle θ (π /cm)	SUP 6	0.55	0.49	—
	SKD 5	—	0.98	0.62
	SKH 2	—	0.29	0.23

ばね材のクリープ試験は弾性限以下の応力で行なうのが妥当であるが、上述のねじり試験では弾性変形と塑性変形との境界が明りように認められなかったが、ねじり強度の30~40%あたりがおよそのばね使用応力

の限度と思われたので、これ以下の応力でクリープ試験を行なった。

荷重を与えて t 時間後の全ひずみを Fig. 4 のように瞬間ひずみ γ_0 とクリープひずみ γ_c にわけて考えることにする。Fig. 5 は種々のねじり応力 τ 対瞬間ひずみ γ_0 の関係を示している。ここに τ は公称ねじり応力、ひずみ γ_0 は γ_0 同様 $\frac{d \cdot \theta}{2l}$ (ただし θ = ねじれ角 rad, d = 直径 mm, l = 標点距離 mm) である。

Fig. 4. Schematic representation of typical creep curve.

Fig. 5. Relation between twisting stress and instantaneous strain.

同一材料では試験温度が高いほど γ_0 は大きく、鋼種によって差はあるが概して 40 kg/mm^2 ではば 1% の瞬間ひずみが生じる。Fig. 6~7 は SUP 6 のねじりクリープひずみ対時間曲線である。150°C においてはねじり応力 31 kg/mm^2 を与えてもクリープはきわめて小さい。これに対し 300°C ではわずか 13 kg/mm^2 (ねじり強さの13%) でもクリープは進行し、応力が増すとクリープは一層大きくなる。しかし、この場合でもクリープ速度は時間とともに徐々に低下している。Fig. 8 は SKD 5 の 300°C に対するクリープ曲線である。応力の大小にかかわらず負荷後約 300hr あたりでクリープ速度はほとんど零となる。とくに、ここで

Fig. 6. Creep strain-time curves of SUP 6 at 150°C.

Fig. 7. Creep strain-time curves of SUP 6 at 300°C.

Fig. 8. Creep strain-time curves of SKD 5 at 300°C.

Fig. 9. Creep strain-time curves of SKD 5 at 400°C.

はクリープ速度に著しい変動が見られる。すなわち、一時的な潜伏期の後に急激なクリープの起こる時期が到来する。Fig. 9 の400℃の場合においては低応力の方は別としてクリープはいつまでも進行していくが、クリープ速度に変動の見られることは300℃の場合と変わらない。Fig. 10~11 は SKH 2 のクリープ曲線である。応力の大小にかかわらず300, 400℃いずれの場合もクリープは進行し、停止することは見られない。なお Fig. 10~11 の黒点で示した曲線は直径4 mm についてのものであるが5 mm のものに比べクリープしやすいようである。つぎに Fig. 12~13 は

Fig. 10. Creep strain-time curves of SKH 2 at 300°C.

Fig. 11. Creep strain-time curves of SKH 2 at 400°C.

Fig. 12. Creep strain-time curves on semi-logarithm scale.

Fig. 13. Creep strain-time curves on semi-logarithm scale.

SKD 5 の400℃と SKH 2 の400℃に対するクリープ曲線を横軸時間を対数目盛でえがいたものである。SKD 5 と SKH 2 の一部ではクリープひずみ γ_0 と時間 t の間には直線関係すなわち $\gamma_0 = A + B \log t$ なる関係がある。なお、これ以外の図は省略したが結果は直線にならず一般に曲線が右に曲がることが知られた。ただし SUP 6 の300℃は例外で逆に上に曲がる曲線が得られた。

3・3 ねじりクリープ強度

Fig. 6~11 よりねじり応力対100hr あるいは300hr 後のクリープひずみの関係を求めたのが Fig. 14 である。〈普通クリープ強度の比較は応力対クリープ速度で行なうことが多いが、本実験ではクリープ速度が零になったり変動するものがあり、また、ばねの性質上ク

Fig. 14. Relations between stress and creep strain in 100 or 300 hours.

リープ速度よりむしろ全クリープひずみが問題となることも多いので、このような方法をとった。これによると SUP 6 の300℃のクリープ強さは低く、SUP 6 の150℃と SKD 5 の300℃の場合が同等のクリープ強さを有し、SKH 2 は SKD 5 に比べ300℃のクリープ強度は多少高いが、400℃のそれは逆になることがある。Table III を参照すると高ねじり強度の

Table IV. Torsional creep strength.

Material	Test temperature °C	Creep strength (kg/mm ²) for 0.03% in		Creep strength (kg/mm ²) for 0.07% in	
		100hr	300hr	100hr	300hr
SUP 6	150	34.0	33.0	—	—
	300	16.0	13.0	23.5	21.5
SKD 5	300	28.0	24.0	54.0	50.0
	400	23.0	15.0	45.5	—
SKH 2	300	41.0	37.0	56.5	55.0
	400	18.0	15.5	43.0	40.0

Table V. Ratio of torsional creep strength to torsional strength.

Material	Test temperature °C	Ratio in creep strength for 0.03% in		Ratio in creep strength for 0.07% in	
		100hr	300hr	100hr	300hr
SUP 6	150	0.32	0.31	—	—
	300	0.19	0.15	0.28	0.25
SKD 5	300	0.23	0.19	0.44	0.41
	400	0.20	0.13	0.40	—
SKH 2	300	0.26	0.24	0.36	0.35
	400	0.12	0.11	0.29	0.27

ものが必ずしもクリープ強さが高いとは言えない。負荷後100hr および300hr に0.03%または0.07%のクリープひずみを生ぜしめるねじりクリープ強度を内・外挿によって Fig. 14 より求めたのが Table IV である。また、これらのクリープ強度がねじり強度の何%に当たるかを Table V に示した。

3・4 潜伏クリープ効果

Fig. 8~9 の SKD 5 のクリープ曲線において潜伏クリープ (Incubation creep) 効果の現われるのを知った。このように比較的低い温度域にてこのような現象の起こることについては既に EAKIN⁴⁾ が431型ステンレス鋼, Inconel X, 19-9 WX 線製高温ばねの250~450°Cにおいて経験しているが理由については触れていない。また Arsenault⁷⁾ らは α -Fe について同様の現象を見出し、その理由を次のように論じているが、彼らの説がわれわれの実験した合金にもあてはまるように思われる。すなわち負荷後変形の進むにつれ転位はC原子や微細析出物につきまわられて動きを阻止されクリープ速度が低くなって行すが、転位源の back stress が十分に減少するとC原子や析出物に捕えられない新たな転位がつくれられクリープ速度が増大する。

温度が低く拡散速度がおそいため動き出した転位は容易にロックすることができず、しばらくこの状態が続くものと解釈される。なお SUP 6 と SKH 2 にこの現象のない理由は明確でないが、炭素量が SKD 5 に比べ多いことが一つの理由と考えられる。

4 総 括

焼入焼きもどし鋼、とくに特殊鋼の中間温度域におけるクリープ挙動は今日充分に明らかにされていないが熱間成型高温ばねではこのようなクリープが問題になる。そこで本研究では高温ばね材として知られる SKD 5 および SKH 2 ならびに JIS ばね鋼中比較的高温用として用いられる SUP 6 の焼入焼きもどし材について、ねじり強さの12~45%のねじり応力の下に150~400°Cのねじりクリープ挙動を観察し、ねじりクリープ強度を測定した。その結果を総括すると

1) すべての場合にクリープが起こるが、時間の経過とともにクリープ速度は漸次低下していく。とくに SUP 6 の150°C, SKD 5 の300°C においては応力の大小にかかわらず負荷後約300hr ぐらいでほとんどクリープは進行しない。これに対し SUP 6 300°C, SKD 5 の400°C, SKH2の300°C と400°C においては測定した時間範囲ではクリープが停止することはなかった。

2) SKD 5 の400°C と SKH 2 400°C の一部で対数型クリープ曲線が得られた。

3) SKD 5 においては300°, 400°C 共にクリープ速度の時間的な変動が認められた。

4) 負荷後100hr に0.03%のクリープを生じさせるねじりクリープ強度は SUP 6 の150°C に対し34kg/mm², 300°C では16kg/mm² である、また SKD 5 の300°Cおよび400°Cではそれぞれ28kg/mm² および23kg/mm² であり、SKH 2 300°C, 400°C ではそれぞれ41kg/mm² および18kg/mm² である。300hr 当り0.03%のねじりクリープ強度はそれぞれ約10%程度低い。

終りに試験片の製作にあたり便宜を与えられた大池工業KK池田敏夫社長に感謝の意を表します。

(昭和39年5月15日日本材料学会第13期総会講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) Metal Progress, **80**, 106 (1961).
- 2) 内山道良, 鉄と鋼, **48**, 979 (1962).
- 3) Clogg, M., Wire and Wire Products, **33**, 401 (1958).
- 4) EAKIN, C., Metall Progress, **81**, 102 (1962).
- 5) Johnson, W., Crooks, R., Machine Design, **10**, 127 (1963).
- 6) 上田太郎, 松尾哲夫, 材料試験, **9**, 508 (1960).
- 7) Arsenault, R., and J. Weertman, Acta Met., **11**, 1119 (1963).